

Научный журнал

# ВЕСТНИК

Сибирского  
государственного  
индустриального  
университета

№ 1 (19), 2017

Основан в 2012 году  
Выходит 4 раза в год

## Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

## Редакционная коллегия

М.В. Темлянец  
(главный редактор)  
С.В. Коновалов  
(отв. секретарь)  
П.П. Баранов  
Е.П. Волынкина  
Г.В. Галевский  
В.Ф. Горюшкин  
В.Е. Громов  
Л.Т. Дворников  
Жан-Мари Дрезет  
Стефан Золотарефф  
Пенг Као  
С.М. Кулаков  
А.Г. Никитин  
Е.Г. Оршанская  
Т.В. Петрова  
Е.В. Протопопов  
В.И. Пантелеев  
Арвинд Сингх  
А.Ю. Столбоушкин  
И.А. Султангузин  
А.В. Феоктистов  
В.Н. Фрянов  
В.П. Цымбал  
Си Чжан Чен

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Патрушев А.О., Шишкин П.Е. Статистическая модель управления процессами контактной сварки рельсов.....4  
Кондратова О.А., Громов В.Е., Мартусевич Е.В., Костерев В.Б., Иванов Ю.Ф. Природа формирования наноразмерных фаз при термомеханическом упрочнении стали.....8  
Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Башенко Л.П., Князев С.В. Оптимизация технологических параметров процесса контактной стыковой сварки рельсов.....12  
Hongyan Cao, Xizhang Chen, Sergey Kononov Corrosion behavior overview and analysis of clam steel vs. weldments in liquid lithium lead at 753 K.....16  
Кузнецов С.Н., Рыбенко И.А., Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Фейлер С.В. Термодинамическое моделирование процессов восстановления железа при термохимическом окисковании конвертерных шламов.....25

### ГОРНОЕ ДЕЛО И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

- Гутак Я.М., Рубан Д.А. Несогласия и перерывы: современное состояние международной терминологии и возможности ее использования российскими специалистами.....29  
Поздеев И.А. Разработка алгоритма расчета метанообильности очистного забоя с учетом геомеханических процессов в углепородном массиве.....32  
Исаченко А.А., Петров А.А. Обоснование по результатам численного моделирования параметров крепи сбоек капитальных выработок, пройденных в неоднородном углепородном массиве.....39  
Домрачев А.Н., Риб С.В., Никитина А.М. Выбор и обоснование алгоритма моделирования работы длинного очистного забоя с учетом влияния неравномерности метановыделения.....44

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

- Стерлигова Я.М., Демина Е.И. Анализ работы ножниц для резки металла.....46

### ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Ниезов О.Х., Эшов Б.Б., Ходжаев Ф.К. Влияние щелочноземельных металлов на анодное поведение свинца в нейтральной среде.....49

### ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Стерлигов В.В., Татарнинова Е.С., Чикурова И.В. Прогнозирование эмиссии диоксида углерода на основе углеродного потенциала топлива.....54

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Гринкевич О.В., Романенко Ю.Е.</b> Анализ структуры и содержания профессиональных стандартов в области металлургического производства.....	59
<b>Казанцева Г.Г.</b> О необходимости и особенностях развития человеческого капитала при инновационной модели развития России.....	63
<b>Рефераты.....</b>	68
<b>К сведению авторов.....</b>	75

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации:  
**ПИ № ФС77-52991** от 01.03.2013 г.

**Адрес редакции:**

654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский государственный индустриальный университет  
каб. 433 М  
тел. 8-3843-74-86-28  
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)  
e-mail: [vestnicsibgiu@sibsiu.ru](mailto:vestnicsibgiu@sibsiu.ru)

**Адрес издателя:**

654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский государственный индустриальный университет  
каб. 336 Г  
тел. 8-3843-46-35-02  
e-mail: [rector@sibsiu.ru](mailto:rector@sibsiu.ru)

**Адрес типографии:**

654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский государственный индустриальный университет  
каб. 280Г  
тел. 8-3843-46-44-02

**Подписные индексы:**

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Подписано в печать

23.03.2017 г.

Выход в свет

27.03.2017 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,5.

Уч.-изд.л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Заказ № 144.

Цена свободная.

*Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, А.О. Патрушев, П.Е. Шишкин*

Сибирский государственный индустриальный университет

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ РЕЛЬСОВ

В настоящее время на железных дорогах осуществляется переход на бесстыковую конструкцию пути. Развитие технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути с требуемыми характеристиками качества, на сегодняшний день является актуальным направлением [1 – 6].

Для сварки рельсов наибольшее распространение получил электроконтактный способ (ЭС), который применяют более чем в 95 % случаев. В Российской Федерации на железнодорожном транспорте применяют только ЭС, которым ежегодно выполняют порядка 600 тыс. стыков рельсов на рельсосварочных предприятиях (РСП) и до 50 тыс. стыков путевыми рельсосварочными самоходными машинами (ПРСМ) [7].

При электроконтактном способе торцы свариваемых рельсов нагреваются теплом, выделенном в контакте между рельсами при пропускании через них тока. Напряжение подается к свариваемым рельсам от сварочных трансформаторов рельсосварочной машины, рельсы перемещаются навстречу друг другу. При соприкосновении торцов возникают единичные контакты, так как касание их происходит не по всей площади рельса, а по микронеровностям. Образующиеся контакты быстро нагреваются и взрываются. Поскольку торцы перемещаются навстречу друг другу, то вместо взорвавшихся контактов образуются новые. Сопротивление каждого элемента и плотность тока, протекающего через него, велики, поэтому контакты нагреваются очень быстро. В местах соприкосновения металл расплавляется и взрывается раньше, чем площадь контакта успеет значительно увеличиться в процессе сближения торцов рельсов. После взрыва элементарных контактов на их месте образуются углубления – кратеры. Новые контакты возникают на месте кратеров лишь через некоторое время, которое определяется скоростью подачи свариваемых рельсов и первоначальной глубиной кратера. В любой момент времени (за исключением моментов замыкания рель-

сов) общая площадь всех контактов значительно меньше площади сечения оплавливаемых деталей. За время существования элементарных контактов участки торцов рельсов, прилегающие к контактам, нагреваются до высоких температур. Часть расплавленного металла при взрыве перемычек выбрасывается наружу в виде брызг, в кратерах остаются узкий слой нагретого, но нерасплавленного металла, и пленка жидкого металла, оставшегося после взрыва [8].

Технологический процесс сварки рельсов электроконтактным способом обычно разделен на несколько этапов: *I* – оплавление, *II* – оплавление, *III* – форсировка, *IV* – осадка, *V* – гратосъем. Первый этап заключается в разогреве контактных поверхностей. Задача второго этапа – добиться равномерного оплавления (жидкого слоя металла) на торцах рельсов. Третий этап – форсировка, заключается в ускоренном движении подвижной станины, что обеспечивает лучшую защиту искрового зазора. Четвертый этап – осадка – торцы быстро сближаются с большим усилием. При этом жидкий металл с оксидными пленками выдавливается из стыка наружу и при затвердевании образует грат, который удаляют в горячем виде на пятом этапе – гратосъеме. Каждый этап характеризуется режимами сварки: силой тока  $I$ , А; напряжением  $U$ , В; величиной перемещения подвижной станины  $S$ , мм; давлением в системе  $P$ , Па; скоростью перемещения подвижной станины  $V$ , мм/с; длительностью этапа  $T$ , с.

В настоящей работе проводили исследование по оптимизации процесса контактной сварки рельсов типа Р65 на машине К1100. Для вышеописанных этапов при сварке на этой машине обычно используют значения основных параметров, приведенных в таблице.

Весь процесс сварки полнопрофильных рельсов контролировался с записью основных параметров в память компьютера аналогичного компьютерного управления, используемого в работе [9]. Отслеживание параметров велось по трем значениям: минимум, максимум и среднее. Эти параметры во время процесса

## Интервалы значений основных параметров

№ п/п	Этап	Интервалы значений параметров сварки					
		$T, c$	$I, A$	$U, B$	$P \cdot 10^{-5}, Па$	$V, мм/с$	$S, мм$
1	<i>I</i> – оплавление	28 – 46	7 – 1088	335 – 440	27 – 42	0,00 – 0,67	4,4 – 5,4
2	<i>II</i> – оплавление	60 – 100	24 – 736	148 – 424	26 – 35	0,22 – 0,89	7,0
3	<i>III</i> – форсировка	4,2 – 6,1	110 – 788	280 – 443	27 – 33	1,33 – 1,89	6,5
4	<i>IV</i> – осадка	1,1 – 3,0	6 – 1174	2 – 423	25 – 129	1,56 – 9,33	17,8 – 18,6
5	<i>V</i> – гратосъем	1,0	2 – 324	1 – 105	71 – 129	0,11 – 0,56	0,1 – 1,0

сварки фиксировались и сохранялись в базе данных в табличном виде и при необходимости в графическом виде (рис. 1).

Технология сварки рельсов на РСР включает в себя обязательную сварку контрольных образцов в начале рабочей смены. Свариваются по два образца на каждую сварочную машину, после чего проводят испытание нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на статический изгиб проводят на прессе типа ПМС-320.

Контрольные образцы испытывались после сварки и удаления грата в сварочной машине без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб контрольный образец имел длину не менее 1200 мм со сварным стыком посередине. Нагрузку прикладывали в середине пролета контрольного образца в месте сварного стыка с расстоянием между опорами 1 м (рис. 2).

Испытание одного контрольного образца проводят с приложением нагрузки на головку (растяжение в подошве), второй контрольный

образец нагружают на подошву (растяжение в головке). Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе  $P_{изг}$ , кН, и значения стрелы прогиба  $f_{пр}$ , мм, при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения этих показателей, если образец не разрушился во время испытаний. На рис. 3 представлен график процесса испытания рельсовых стыков. Далее фактические показатели сравнивают с нормативными. Если образец выдержал нормативные требования, начинается сварка рельсов в плетель. В случае, если образец не выдержал нормативных требований, производят повторную сварку. Если же повторные испытания также имеют не удовлетворительный исход, предпринимаются действия по поиску причин низких показателей и корректировке технологических режимов.

Каждый технологический этап имеет свою продолжительность, внутри этого этапа контролируемые параметры изменяются в широком диапазоне (рис. 1). Для описания процесса контактной сварки рельсов в настоящей работе применяли метод статистического моделирования. Для его реализации необходимо уста-

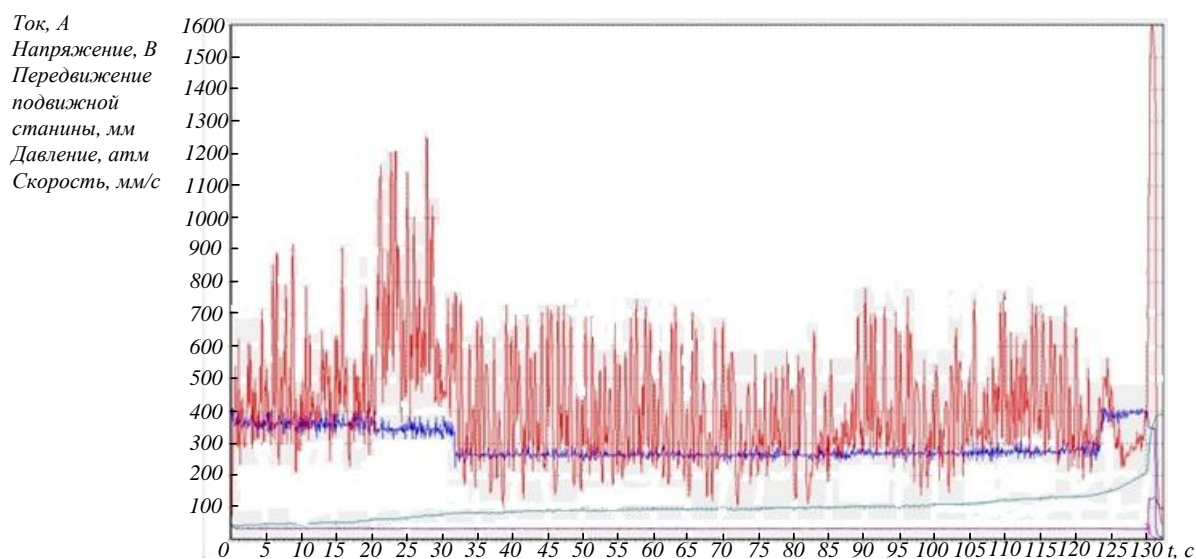


Рис. 1. Оциллограмма процесса сварки



Рис. 2. Схема испытания на статический поперечный изгиб

новление независимых (входных) переменных, а также выявление зависимых (выходных) параметров. Для создания математической модели процесса контактной сварки рельсов использовалась имеющаяся база данных параметров сварочных режимов и результатов испытаний сварных соединений. В результате предварительного анализа параметров процесса контактной сварки рельсов установлены независимые (входные) переменные и зависимые (выходные) параметры. Независимые (входные) переменные, такие как  $I$ ,  $U$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $V$ , являются параметрами сварочного режима, влияющими на качество сварного шва рельсов. В качестве зависимых (выходных) параметров выбраны величина усилия, возникающего при изгибе  $P_{изг}$ , кН, и значение стрелы прогиба  $f_{пр}$ , мм, при которых происходит разрушение контрольного образца.

После обработки данных производственного контроля и параметров сварочных режимов были получены таблицы для каждого этапа, в которых приведены основные фактические значения сварочных режимов на машине контактной стыковой сварки К1100 и результатов испытаний сварных соединений, состоящие из 80 наблюдений.

На основе полученных производственных данных была проведена их статистическая обработка с использованием пакета STATISTICA 6.0. Оценка влияния параметров сварочных режимов на величину усилия  $P_{изг}$  и значение  $f_{пр}$  проводилась средствами многофакторного корреляционного анализа, который позволяет изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов [10, 11].

Вычисление коэффициентов регрессионных уравнений проводили матричным методом с использованием пакета STATISTICA 6.0. Уравнение регрессии представлено в следующем виде:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n, \quad (1)$$

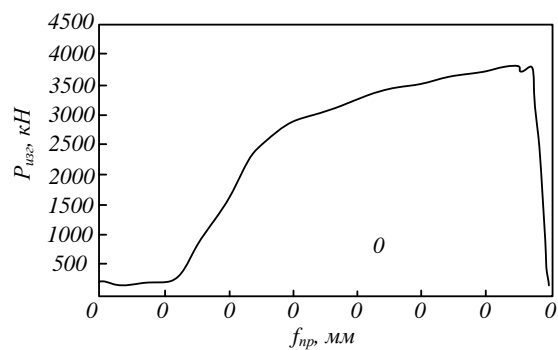


Рис. 3. График процесса испытания рельсовых стыков

где  $Y$  – зависимый (выходной) параметр;  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – независимые (входные) переменные;  $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$  – коэффициенты регрессии.

На каждом технологическом этапе сварки были построены регрессионные модели с выходными параметрами  $P_{изг}$  и  $f_{пр}$  и рассчитаны коэффициенты детерминации:

– модели на первом этапе оплавления

$$P_{изг} = 5129,96 + 49,02 V_{ср} + 9,63 V_{мин} + 12,54 V_{макс} - 10,14 S_{прип} - 3,92 S_{поз} - 51,61 P_{ср} + 6,82 P_{мин} + 19,54 P_{макс} + 8,59 U_{ср} - 7,95 U_{мин} - 2,69 U_{макс} - 3,72 I_{ср} + 1,51 I_{мин} - 1,21 I_{макс} - 2,24 T_{длит};$$

$$R^2 = 0,24; \quad (1.1)$$

$$f_{пр} = -100,44 + 3,22 V_{ср} + 1,01 S_{поз} - 2,96 P_{мин} - 0,61 P_{макс} + 0,55 U_{ср} - 0,35 U_{макс} + 0,08 I_{ср} + 0,10 I_{макс};$$

$$R^2 = 0,50; \quad (1.2)$$

– модели на втором этапе оплавления

$$P_{изг} = 11497,07 + 57,11 V_{ср} + 178,46 V_{мин} - 86,14 V_{макс} - 6,99 S_{прип} - 2,12 S_{поз} - 119,85 P_{ср} - 69,42 P_{мин} - 21,97 P_{макс} - 11,16 U_{ср} + 0,45 U_{мин} - 0,49 U_{макс} + 2,40 I_{ср} + 5,24 I_{мин} + 1,70 I_{макс} - 0,22 T_{длит} - 1,39 T_{нач};$$

$$R^2 = 0,20; \quad (2.1)$$

$$f_{пр} = -436,24 + 1,92 V_{ср} + 7,94 V_{мин} - 0,49 V_{макс} + 5,92 S_{прип} + 0,332 S_{поз} - 0,03 P_{ср} - 0,24 P_{мин} - 4,47 P_{макс} + 0,56 U_{ср} + 0,07 U_{мин} - 0,11 U_{макс} + 0,22 I_{ср} - 0,05 I_{мин} - 0,02 I_{макс} - 0,03 T_{длит};$$

$$R^2 = 0,27; \quad (2.2)$$

– модели на этапе форсировки

$$P_{изг} = 5792,22 + 159,64 V_{ср} + 60,29 V_{мин} + 33,69 V_{макс} + 4,72 S_{прип} - 15,53 S_{поз} + 52,83 P_{ср} - 130,84 P_{мин} + 55,38 P_{макс} - 11,82 U_{ср} + 0,15 U_{мин} + 11,43 U_{макс} - 4,71 I_{ср} - 0,35 I_{мин} - 0,29 I_{макс} + 14,28 T_{длит} - 0,29 T_{нач};$$

$$R^2 = 0,15; \quad (3.1)$$

$$f_{пр} = -5,95 - 4,68 V_{ср} + 4,30 V_{мин} + 1,47 V_{макс} + 1,90 S_{прип} - 0,37 S_{поз} + 0,82 P_{ср} - 2,30 P_{мин} - 2,98 P_{макс} + 0,19 U_{ср} - 0,04 U_{мин} + 0,21 U_{макс} + 0,04 I_{ср} - 0,02 I_{мин} + 0,57 T_{длит};$$

$$R^2 = 0,20; \quad (3.2)$$

– модели на этапе осадки

$$P_{изг} = -1856,13 + 200,10 V_{ср} - 43,91 V_{мин} + 6,52 V_{макс} - 18,40 S_{прип} - 15,05 S_{поз} + 22,86 P_{ср} - 3,32 P_{мин} + 61,72 P_{макс} + 7,28 U_{ср} - 0,07 U_{мин} - 13,67 U_{макс} - 2,63 I_{ср} - 0,19 I_{мин} + 3,92 I_{макс} + 39,64 T_{длит} - 0,43 T_{нач}; R^2 = 0,24; \quad (4.1)$$

$$f_{пр} = -161,50 + 2,00 V_{ср} - 0,01 V_{мин} + 0,16 V_{макс} - 0,14 S_{прип} - 0,26 S_{поз} - 0,82 P_{ср} + 0,10 P_{мин} + 2,42 P_{макс} + 0,11 U_{ср} - 0,06 U_{макс} - 0,02 I_{ср} - 0,01 I_{мин} + 0,03 I_{макс} + 0,79 T_{длит} - 0,01 T_{нач}; R^2 = 0,15; \quad (4.2)$$

– модели на этапе гратосъема

$$P_{изг} = 2878,60 + 941,99 V_{ср} + 72,97 V_{макс} - 128,93 S_{прип} - 1,88 S_{поз} + 104,21 P_{ср} - 84,19 P_{мин} - 13,36 P_{макс} + 5,19 U_{ср} - 102,99 U_{мин} + 54,51 U_{макс} + 19,41 I_{ср} - 0,55 I_{мин} - 20,33 I_{макс} - 0,47 T_{нач}; R^2 = 0,36; \quad (5.1)$$

$$f_{пр} = 97,35 - 36,29 V_{ср} - 2,95 V_{макс} + 2,83 S_{прип} - 0,13 S_{поз} + 3,31 P_{ср} - 2,08 P_{мин} - 1,30 P_{макс} + 1,09 U_{ср} - 3,80 U_{мин} + 0,91 U_{макс} + 1,56 I_{ср} - 1,07 I_{мин} - 0,56 I_{макс}; R^2 = 0,18; \quad (5.2)$$

здесь  $T_{длит}$  – длительность этапа,  $T_{нач}$  – время начала этапа;  $S_{поз}$  – текущее положение подвижной станины.

Коэффициенты детерминации для каждой модели имеют низкие значения, это говорит о том, что входные переменные на каждом отдельном этапе процесса контактной сварки не в полной мере отражают полноту своего влияния на выходные параметры. Очевидно, что каждый из этапов оказывает влияние на выходные параметры, но полное влияние входных переменных можно оценить только в совокупности этих этапов.

Отбросив неудовлетворяющие параметры по  $t$ -критерию Стьюдента и собрав эти параметры каждого этапа в одном уравнении, получили следующие модели, описывающие весь процесс в целом:

$$P_{изг} = 814,08 - 12,93 I_{макс5} + 40,84 U_{макс5} - 0,64 T_{нач4} - 0,26 I_{мин4} + 3,20 I_{макс4} - 6,29 U_{макс4} - 2,12 P_{мин4} + 41,79 P_{макс4} + 53,33 V_{ср4} + 6,60 I_{ср1} - 219,91 P_{ср1}; R^2 = 0,79 \quad (6.1);$$

$$f_{пр} = -194,21 - 0,24 I_{макс5} - 0,02 T_{нач4} + 0,07 I_{макс4} + 2,43 P_{макс4} - 0,75 P_{ср4} + 1,94 V_{ср4} + 0,01 I_{макс3} + 0,05 T_{длит4} + 0,08 I_{ср1} - 3,32 P_{ср1}; R^2 = 0,71. \quad (6.2);$$

Полученные уравнения регрессии учитывают влияние каждого технологического этапа процесса контактной сварки рельсов на выходные свойства. Данные модели имеют достаточно высокие коэффициенты детерминации; по  $t$ -критерию Стьюдента коэффициенты регрессии всех входных переменных значимы; модель является адекватной по  $F$ -критерию

Фишера (для  $P_{изг}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  имеем  $F_{факт} = 9,88 > F_{кр} = 0,38$ ; для  $f_{пр}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  имеем  $F_{факт} = 6,90 > F_{кр} = 0,38$ ).

Адекватность уравнений регрессии (6.1), (6.2) проверялась по показателю средней ошибки аппроксимации [12]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100,$$

где  $m$  – количество наблюдений;  $\tilde{Y}_i$  – вычисленное значение результирующего показателя;  $Y_i$  – фактическое значение результирующего показателя.

Для показателей  $P_{изг}$  и  $f_{пр}$  средняя ошибка аппроксимации составила 2,8 и 5 % соответственно.

Анализ распределения остатков показал, что явного отклонения от нормального закона распределения не наблюдается, т. е. остатки распределены случайно и в модели отсутствуют неучтенные параметры, влияющие на выходной параметр. Модель пригодна для принятия решений и для прогнозирования.

**Выводы.** На основании экспериментальных данных разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине K1100, позволяющие оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварного шва. С помощью разработанных регрессионных моделей предложено прогнозировать качество сварного шва и управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meade B. Railroad welding demands specialized processes // Welding journal. 1997. Vol. 76. № 9. P. 47 – 52.
2. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galai M.S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails // Welding International. 2014. Vol. 28. № 3. P. 245 – 247.
3. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // Welding International. 2014. Vol. 28. № 7. P. 510 – 520.

4. Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report) // *Welding International*. 1997. Vol. 11. № 6. P. 452 – 461.
5. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya. I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // *Welding International*. 2008. Vol. 22. № 5. P. 338 – 341.
6. Irving, B., Long Island Rail Road orders an all-welded fleet // *Welding journal*. 1997. Vol. 22. № 9. P. 33 – 37.
7. Калашников Е.А., Королев Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // *Путь и путевое хозяйство*. 2015. № 8. С. 2 – 6.
8. Оборудование для контактной сварки рельсов и его эксплуатация / Под ред. С.А. Солодовникова и др. / Академия наук УССР. – Киев: Наукова думка, 1974. – 184 с.
9. Журавлев С.И., Сударкин А.Я., Сергеев Л.С., Королева А.Б. Технологические возможности оборудования для контактной стыковой сварки с компьютерным управлением // *Сварка и диагностика*. 2009. № 3. С. 51 – 57.
10. Анализ данных в материаловедении. Ч. 2. Регрессионный анализ: учеб. пособие / Под ред. А.С. Мельниченко. – М.: ИД МИСиС, 2014. – 87 с.
11. Куценко А.И., Черемушкина Е.М., Щеглов В.А., Усольцев А.А. Статистический анализ технологических процессов в среде STATISTICA и EXCEL: учеб. пособие. – Томск: изд. ТПУ, 2010. – 277 с.
12. Практикум по теории статистики: учеб. пособие / Под ред. Р.А. Шмойловой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 416 с.

© 2017 г. Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев,  
А.А. Усольцев, А.О. Патрушев, П.Е. Шишкин  
Поступила 27 января 2017 г.

УДК 621.78.011:669.14

**О.А. Кондратова, В.Е. Громов, Е.В. Мартусевич, В.Б. Костерев, Ю.Ф. Иванов**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

### **ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ СТАЛИ\***

Ускоренное охлаждение проката в потоке станов при термомеханической обработке (ТМО) является эффективным способом получения металлопродукции из низкоуглеродистых сталей с высокими механическими свойствами [1 – 3].

Исследование процессов термомеханической обработки, включающей ускоренное охлаждение, должно устанавливать связи между механическими свойствами готового продукта и эволюцией структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры для каждого конкретного изделия. Только в этом случае возможна разработка оптимальных режимов

упрочнения и целенаправленное управление эксплуатационными свойствами.

Деформация стали при термомеханической обработке, наряду с эволюцией дефектной подсистемы, практически всегда сопровождается фазовыми превращениями, которые протекают при интенсивном взаимодействии атомов углерода с дефектами кристаллической решетки [4 – 7]. В этих работах установлены количественные закономерности формирования структурно-фазовых состояний, механических и трибологических свойств при ускоренном охлаждении двутавровой балки в различных режимах, свидетельствующие о поверхностном упрочнении материала. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии показано, что структура, фазо-

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-48-420530.

вый состав и дефектная субструктура упроченной зоны определяются: 1) механизмом  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, 2) режимом высокотемпературной прокатки и ускоренного охлаждения, 3) расстоянием до поверхности ускоренного охлаждения. Выявлено формирование, в результате реализации различных механизмов  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, зерен феррита и перлита, кристаллов бейнита и мартенсита.

Формирование наноразмерных фаз при термомеханической обработке проката связано с преобразованием карбидной подсистемы [8, 9]. Многочисленные исследования углеродистых сталей выявили несколько карбидных фаз на основе железа, различающихся относительной концентрацией углерода, параметрами и типом кристаллической решетки. Оно заключается в переходе одного карбида в другой, растворению карбида и его повторному выделению, растворению карбида и уходу атомов углерода на дефекты кристаллического строения феррита и его кристаллическую решетку. Подробный анализ результатов, полученных при исследовании превращения в карбидной подсистеме перлитных сталей, подвергнутых различным видам деформирования, представлен в работе [3].

Преобразование карбидов железа тесно связано с перераспределением углерода в стали. Углерод в структуре стали может находиться в твердом растворе на основе  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железа (позиции элементов внедрения), на дислокациях (в виде атмосфер Коттрелла и Максвелла), на межфазных (карбид/матрица) и внутрифазных (зерна, пакеты, кристаллы мартенсита и бейнита) границах, в частицах карбидной фазы.

В работах [10 – 18] представлены результаты анализа распределения углерода в сталях близкого химического состава 38ХНЗМФА и 30ХН2МФА с мартенситной и бейнитной структурами, подвергнутых деформации сжатием до разрушения.

Для закаленной стали 38ХНЗМФА проведенные оценки показали, что с увеличением степени деформации ( $\epsilon$ ) суммарное количество атомов углерода, расположенных в твердом растворе на основе  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железа, снижается, а количество атомов углерода, расположенных на дефектах структуры, – увеличивается. Особенно интенсивно процесс ухода атомов углерода на дефекты протекает при  $\epsilon \geq 0,2$ .

Для стали 30ХН2МФА с бейнитной структурой с увеличением степени деформации количество атомов углерода, расположенных в твердом растворе на основе  $\alpha$ -железа, формирующих частицы цементита, расположенные на

внутрифазных границах, и расположенных на дефектах кристаллической структуры, увеличивается. Количество атомов углерода, формирующих частицы цементита, лежащие в объеме пластин бейнита, и расположенных в твердом растворе на основе  $\gamma$ -железа, снижается.

При термомеханической обработке с ускоренным охлаждением двутавровой балки из низкоуглеродистой стали 09Г2С [4 – 7] преобразование карбидной фазы происходит по различным направлениям и механизмам: 1) разрезание цементита движущимися дислокациями; 2) растворение пластин цементита перлитных колоний и повторное выделение частиц цементита на дислокациях, границах блоков, субзерен и зерен; 3) распад твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе, формирующегося в условиях ускоренного охлаждения стали («самоотпуск» мартенсита); 4) допревращение остаточного аустенита, присутствующего в структуре бейнита и мартенсита с образованием частиц карбида железа; 5) реализация диффузионного механизма  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в условиях высокой степени деформации и высоких температур.

1. При разрезании пластин цементита движущимися дислокациями происходит сдвиг и поворот частей пластин друг относительно друга, а также вынос отдельных фрагментов наноразмерного диапазона в феррит.

2. При термомеханической обработке фиксируется диспергирование субструктуры цементита с образованием блочной структуры с размером блоков 30 – 50 нм. На последующих стадиях преобразования размеры блоков уменьшаются до 5 – 30 нм, блоки становятся более разориентированными. Величина азимутальной составляющей полного угла разориентации блочной структуры пластин карбидной фазы достигает 20 – 24 градусов.

Формирование блочной структуры сопровождается уходом атомов углерода из карбида на дислокации и последующим выделением в объеме ферритных пластин в виде частиц карбида железа наноразмерного диапазона (5 – 10 нм).

Этот механизм разрушения пластин цементита энергетически выгоден вследствие того, что энергия связи атомов углерода с дислокациями в феррите существенно превышает энергию связи атомов углерода с атомами железа в решетке цементита. Энергия связи атомов углерода в карбидах железа и с дефектами кристаллической решетки углеродистой стали [19 – 22] представлена ниже:



Место локализации	Энергия, эВ
Цементит	0,27
Атмосферы Коттрелла	0,55
Ядра дислокаций	0,75
Вакансии	0,41
Субграницы и границы зерен	0,45
На дефектах вообще	0,61

Дислокации, окружающие пластину цементита, являются более предпочтительным местом расположения атомов углерода и, следовательно, будут забирать углерод из цементита с образованием атмосфер Коттрелла и Максвелла.

Этот процесс может протекать в несколько стадий [4 – 7]. Во-первых, вокруг пластин (в первую очередь, в торцах пластин, указывая на наиболее напряженные места в перлитной колонии) цементита формируется дислокационная субструктура в виде клубков, которые на следующем этапе окружают всю пластину цементита.

На этой стадии в межпластинчатом пространстве (ламелях феррита) выявляются частицы карбидной фазы. Частицы имеют округлую форму, размеры их изменяются в пределах единиц нанометров.

Вынос атомов углерода из разрушенных пластин цементита возможен и на гораздо большие расстояния. Частицы цементита размером 5 – 15 нм выявляются в объеме субзерен на дислокациях и на границах субзерен, формирующихся вдоль границы перлитного зерна. Выделяющиеся на границах субзерен частицы карбидной фазы будут препятствовать их росту, стабилизируя размеры субзерен и свойства изделия в целом при последующей его эксплуатации.

3. Ускоренное охлаждение двутавровой балки приводит к формированию в поверхностном слое структуры пакетного мартенсита.

Последующий «самоотпуск» стали под действием остаточного тепла объема заготовки сопровождается релаксацией дислокационной субструктуры, выражающейся в снижении скалярной плотности дислокаций, разрушении малоугловых границ кристаллов мартенсита, выделении на дислокациях в объеме кристаллов мартенсита и по границам кристаллов частиц карбидной фазы. Размеры частиц, расположенных на дислокациях, изменяются в пределах 5 – 10 нм, расположенных на границах, – в пределах 10 – 30 нм.

4. По сравнению с вышерассмотренными механизмами формирование частиц цементита в процессе допревращения остаточного аусте-

нита, присутствующего в мартенсите и бейните, протекает не столь заметно. На электронно-микроскопических изображениях структуры выявлен контраст, соответствующий предвыделению карбидной фазы размером 5 – 10 нм. Объемная доля таких частиц невелика.

5. Высокий уровень пластической деформации стали, реализующийся при термомеханической обработке проката, приводит к диспергированию структур, формирующихся в процессе диффузионного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения до наномасштабного размера. В тонкопластинчатом перлите толщина пластин карбидной фазы составляет примерно 25 нм [4 – 7]. В пластинах цементита формируется структура с высоким уровнем разориентации блоков. С уменьшением среднего размера блоков величина азимутального размытия рефлексов карбидной фазы устойчиво увеличивается. Отметим, что подобного типа зависимости, связывающие средние размеры кристаллитов и количество рефлексов одного и того же дифракционного кольца, были получены на ряде нанокристаллических пленочных материалов в работе [23].

**Выводы.** Таким образом, в результате термомеханической обработки двутавровой балки из стали 09Г2С формируются наноразмерные частицы карбидной фазы, упрочняющие поверхностные слои. Основными процессами, ответственными за образование наноразмерных фаз, являются разрезание движущимися дислокациями; растворение пластин цементита и повторное выделение на дислокациях, границах блоков и субзерен; распад твердого раствора при «самоотпуске» мартенсита, диффузионное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение при высоких температурах и степенях деформации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
2. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. – М.: Мир, 1977. – 432 с.
3. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. – Новосибирск: Наука, 1993. – 280 с.
4. Ivanov Yu., Nikitina E.N., Gromov V.E. Carbon distribution in bainitic steel subjected to deformation. AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1683, № 020075.
5. Громов В.Е., Никитина Е.Н., Иванов Ю.Ф., Аксенова К.В., Корнет Е.И. Деформационное упрочнение стали с бейнитной

- структурой // Успехи физики металлов. 2015. Т. 16. № 4. С. 299 – 328.
6. Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu. F., Aksenova K.V., Semina O.A. Bainite steel: structure and work hardening // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 1. С. 87 – 100.
  7. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Глезер А.М., Никитина Е.Н., Аксенова К.В. Локализация пластической деформации на наноуровне в стали с бейнитной структурой // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 8. С. 18 – 21.
  8. Иванов Ю.Ф., Корнет Е.В., Козлов Э.В., Громов В.Е. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. – 174 с.
  9. Формирование и эволюция структурно-фазовых состояний и свойств сталей в современных технологиях обработки давлением / А.Б. Юрьев, В.Е. Громов, Б.М. Лебошкин, Э.В. Козлов, В.Я. Чинокалов, В.И. Базайкин, Ю.Ф. Иванов, В.Д. Сарычев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 347 с.
  10. Корнет Е.И., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Громов В.Е. Эволюция структурно-фазовых состояний закаленной конструкционной стали при деформации // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 66 – 70.
  11. Корнет Е.И., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Локализация пластической деформации закаленной конструкционной стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 10. С. 34 – 37.
  12. Иванов Ю.Ф., Корнет Е.И., Громов В.Е., Коновалов С.В. Структурно-фазовые превращения в закаленной конструкционной стали при деформации // Успехи физики металлов. 2009. Т. 10. № 4. С. 389 – 414.
  13. Корнет Е.И., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Громов В.Е. Перераспределение углерода при деформации закаленной конструкционной стали // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. № 1. С. 101 – 104.
  14. Иванов Ю.Ф., Корнет Е.И., Громов В.Е. Структурно-фазовые превращения в закаленной конструкционной стали, деформированной одноосным сжатием // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 1. С. 8 – 13.
  15. Костерев В.Б., Белов Е.Г., Ефимов О.Ю. и др. Изменение химического состава высокоуглеродистых сплавов на основе железа после плазменной обработки и высокотемпературном контактном изнашивании. – В кн.: Сборник тезисов шестой международной конференции ФППК-2010 «Фазовые превращения и прочность кристаллов», посвященной памяти академика Г.В. Курдюмова. – Черноголовка: изд. ИМФМ, 2010. – 149 с.
  16. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ефимов О.Ю. и др. Формирование дефектной субструктуры и наноразмерных фаз при термомеханическом упрочнении малоуглеродистой стали // Сборник статей международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». – Витебск: УО «ВГЕУ», 2011. С. 24 – 26.
  17. Костерев В.Б., Мясникова В.И., Коновалов С.В. и др. Анализ структурно-фазовых состояний стали при термомеханическом упрочнении. – В кн.: Материалы Республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов по физике конденсированного состояния (ФКС – XIX). – Гродно: изд. ГРГУ, 2011. С. 283 – 285.
  18. Костерев В.Б., Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф. и др. Закономерности формирования прочностных свойств при термомеханическом упрочнении малоуглеродистой стали по режиму ускоренного охлаждения. – В кн.: Тезисы V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург: изд. ИМаш РАН, 2011. – 23 с.
  19. Штремаль М.А. Прочность сплавов. Ч. II. Деформация. Учебник для вузов. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
  20. Tawari R.A., Mukunda P.G., Dhar P.R. Embrittlement of tempered martensite // Trans Indian Met. 1969. Vol. 22, no.1. P. 36 – 40.
  21. Лахтин И.М. Материаловедение и термическая обработка материалов. – М.: Металлургия, 1977. – 407 с.
  22. Утевский Л.М., Гликман Е.Э., Кларк Г.С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. – М.: Металлургия, 1987. – 222 с.
  23. Иванов Ю.Ф., Пауль А.В., Козлов Э.В. и др. Электронно-микроскопический дифракционный анализ ультрадисперсных материалов // Заводская лаборатория. 1992. № 12. С. 38 – 40.

© 2017 г. О.А. Кондратова, В.Е. Громов, Е.В. Мартусевич, В.Б. Костерев, Ю.Ф. Иванов  
Поступила 6 февраля 2017 г.

*Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко, С.В. Князев*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ РЕЛЬСОВ

Современный этап развития путевого хозяйства характеризуется все большим распространением прогрессивных ресурсосберегающих технологий ремонта и технического обслуживания железнодорожного пути, высокопроизводительных путевых машин, внедрением эффективных конструкций пути, к числу которых относится и бесстыковая путь. Развитие технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути с требуемыми качественными характеристиками, в настоящее время является актуальным направлением [1 – 6].

Технологический процесс сварки рельсов электроконтактным способом обычно разделен на несколько этапов: I этап оплавления (1), II этап оплавления (2), форсировка (3), осадка (4), гратосъем (5). Каждому этапу соответствуют определенные характеристики (режимы сварки):  $I$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение, В;  $S$  – величина перемещения подвижной станины, мм;  $P$  – давление в системе, атм;  $V$  – скорость перемещения подвижной станины, мм/с;  $T$  – длительность этапа, с (индексы соответствуют этапам  $I$  – 5).

Технология сварки рельсов на рельсосварочных предприятиях включает в себя обязательную сварку контрольных образцов в начале рабочей смены. Свариваются по два образца на каждой сварочной машине, после чего согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом» проводят испытания нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб. Испытания проводят на прессе типа ПМС-320. Испытание одного контрольного образца проводят с приложением нагруз-

ки на головку (растяжение в подошве), второй контрольный образец нагружают на подошву (растяжение в головке). Результатами испытаний являются значения усилия, возникающего при изгибе ( $P_{изг}$ , кН), и значения стрелы прогиба ( $f_{пр}$ , мм), при которых происходит разрушение контрольного образца, или максимальные значения этих показателей, если образец не разрушился во время испытаний.

В настоящей работе проведена оптимизация процесса контактной сварки рельсов типа Р65 на машине К1100.

Для вышеописанных этапов при сварке на машине К1100 обычно используют значения основных параметров, приведенных в табл. 1.

По параметрам технологического процесса производственного контроля ранее были разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине К1100, которые позволяют оценивать полноту влияния этих параметров на качество сварного шва:

$$P_{изг} = 814,08 - 12,93I_{макс5} + 40,84U_{макс5} - 6,40T_{нач4} - 0,26I_{мин4} + 3,20I_{макс4} - 6,29U_{макс4} - 2,12P_{мин4} + 41,79P_{макс4} + 53,33V_{ср4} + 6,60I_{ср1} - 219,91P_{ср1}$$

$$f_{пр} = -194,21 - 0,24I_{макс5} - 0,02T_{нач4} + 0,07I_{макс4} + 2,43P_{макс4} - 0,75P_{ср4} + 1,94V_{ср4} + 0,01I_{макс3} + 0,05T_{длит1} + 0,08I_{ср1} - 3,32P_{ср1},$$

где индекс  $I$  – 5 означают номер этапа.

Современная аппаратура управления обеспечивает работу в разных режимах: «Ручное управление», «Полуавтоматическое управление», «Автоматическое управление». Режим

Таблица 1

**Значения основных параметров при сварке на машине К1100**

Этап	Интервалы значений параметров сварки					
	$T$ , с	$I$ , А	$U$ , В	$P$ , атм	$V$ , мм/с	$S$ , мм
I этап оплавления	28 – 46	7 – 1088	335 – 440	27 – 42	0,00 – 0,67	4,4 – 5,4
II этап оплавления	60 – 100	24 – 736	148 – 424	26 – 35	0,22 – 0,89	7,0
Форсировка	4,2 – 6,1	110 – 788	280 – 443	27 – 33	1,33 – 1,89	6,5
Осадка	1,1 – 3,0	6 – 1174	2 – 423	25 – 129	1,56 – 9,33	17,8 – 18,6
Гратосъем	1	2 – 324	1 – 105	71 – 129	0,11 – 0,56	0,1 – 1,0

«Ручное управление» обеспечивает безопасную эксплуатацию машины с соблюдением всех блокировок, режим «Полуавтоматическое управление» – подготовительные операции для сварки, режим «Автоматическое управление» – сварку изделия по заданной программе. Контроллер выполняет все функции управления технологическим процессом сварки. Компьютер обеспечивает анимацию процесса, цифровую и графическую визуализацию параметров процесса, документирование параметров сварки. Визуализация процесса сварки в виде осциллограммы позволяет представлять информацию по динамическому изменению программируемых параметров: напряжение  $U$ , сварочный ток  $I$ , давление  $P$  в цилиндре, перемещение  $S$  заготовок в процессе получения соединения.

Управление оплавлением при сварке осуществляется путем корректировки задаваемой скорости оплавления в зависимости от текущего значения тока. Это осуществляется изменением: уставок начала коррекций скорости (тока коррекции  $I_{кор}$ ); тока  $I_{ост}$ , останавливающего подачу; тока  $I_{рев}$ , дающего команду на реверс. Для этого программируемые значения скорости и тока оплавления, реализующие обратную связь величин  $I_{кор}$ ,  $I_{ост}$ ,  $I_{рев}$ , подбирают таким образом, чтобы фактическое среднее значение тока на осциллограмме было в два раза меньше тока короткого замыкания. Это соответствует максимуму электрической мощности, развиваемой в контакте между оплавляемыми торцами заготовок. Недопустимые отклонения тока в форме скачкообразных изменений его величины исключаются благодаря быстродействующей обратной связи. Эта же обратная связь стабилизирует текущее значение сварочного тока.

Принцип работы корректора скорости оплавления с обратной связью по сварочному току показан на рисунке: в точке пересечения кривых мощность, развиваемая машиной (2), и мощность, необходимая для оплавления деталей (1), одинаковы, что обеспечивает устойчивое протекание оплавления. При случайном увеличении тока от установившегося значения  $I_{уст}$  мощность, развиваемая машиной, оказывается больше мощности, необходимой для оплавления. Избыточная мощность способствует ускорению нагрева и разрушению элементарных контактов и, как следствие, увеличению сопротивления искрового промежутка, что сопровождается уменьшением тока до значения  $I_{уст}$ . При токе, меньшем  $I_{уст}$ , мощность, развиваемая машиной, оказывается меньше мощности, необходимой для оплавления. Со-

противление искрового промежутка уменьшается, что приводит к восстановлению установившегося значения тока. Если зависимость (1) использовать, чтобы задавать изменение скорости подачи деталей в функции тока, то такой корректор скорости обеспечит устойчивое оплавление по току [7].

В работе [7] приведено уравнение корректора, в котором зависимой величиной от текущего значения тока является напряжение на якоре электродвигателя привода перемещения подвижной плиты машины. После замены его на скорость перемещения подвижной плиты получим следующее уравнение корректора:

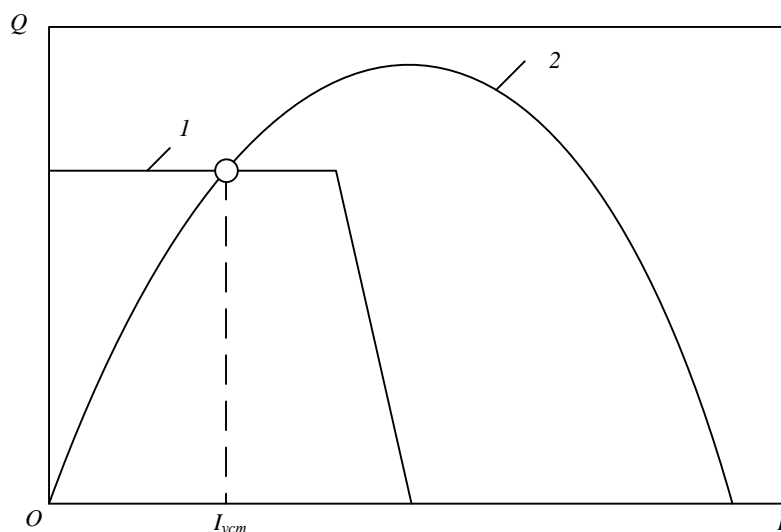
$$\Delta V = k (I_1(t) - I_0 + \delta) \text{ при } I_1(t) - I_0 > \delta,$$

где  $\Delta V$  – изменение скорости перемещения подвижной плиты;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $I_1(t)$  – текущее значение тока;  $I_0$  – заданное значение тока (установка);  $\delta$  – зона нечувствительности схемы сравнения.

Для нормальной работы корректора скорости необходимо постоянство среднего значения тока в течение всего времени сварки. При форсировке режим предусматривает нарастание тока перед осадкой, в этом случае подаются ложные команды на снижение скорости подачи деталей (см. рисунок).

В режиме пульсирующего оплавления для каждого этапа на сварочной машине К1100 возможна регулировка по следующим параметрам:

- путь – величина хода подвижной станины на участках;
- $I_1$  – ток, при котором машина будет двигаться вперед до достижения величины установленного тока (зона нечувствительности);
- $I_2$  – ток, при выполнении условия  $I_1 \geq I_2$  машина останавливается;
- $I_3$  – ток, при выполнении условия  $I_2 \geq I_3$  машина «разводится» по заданной зависимости;
- $V_v$  – скорость «сближения» машины при оплавлении;
- $V_n$  – скорость «разведения» машины при оплавлении;
- $T$  – время осадки под током;
- осадка – величина осадки;
- проковка – время после выполнения осадки и до команды на гратосъем;
- гратосъем – полный ход машины для снятия грата;
- исходное – точка начала сварки;
- напряжение по ступеням – сварочное напряжение по ступеням.



Зависимость мощности, необходимой для оплавления деталей (1), и мощности, развиваемой машиной (2), от тока ( $I_{уст}$  – установившееся значение тока)

Обычно оптимизацию проводят по одному наиболее важному выходному параметру, при этом для остальных выходных параметров задают ограничения. Однако если выходные параметры коррелируют, то нет необходимости задавать граничные значения для менее важного параметра. Чем ближе найденное значение коэффициента корреляции к единице, тем сильнее значение параметра зависит от того, какое значение принимает другой параметр, то есть между такими параметрами существует линейная связь, и при изучении процесса можно рассматривать только один из них [8].

Для проверки значимости коэффициента  $R$  парной корреляции между  $P_{изг}$  и  $f_{пр}$  сравним его значение с табличным (критическим) значением ( $r_{кр}$ ), которое приведено в работе [8]. Критическое значение коэффициента корреляции выбирается, исходя из числа степеней свободы ( $f = n - 2 = 78$ , где  $n = 80$  – количество экспериментов), при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $P = 0,95$ ). В рассматриваемом случае  $R = 0,65 > r_{кр} = 0,217$ ; таким образом, между

параметрами имеется тесная линейная связь, оптимизацию можно проводить только по одному параметру.

При оптимизации с использованием регрессионных моделей необходимо задать границы варьирования параметров. Этими границами являются максимальные и минимальные значения параметров, по которым строили регрессионные модели.

Максимальные и минимальные значения входных параметров приведены в табл. 2.

О характере влияния факторов свидетельствуют знаки коэффициентов регрессии: знак плюс – с увеличением значения фактора растет величина параметра оптимизации, знак минус – убывает. Так как нужно найти максимум функции отклика, то увеличение значений всех факторов, коэффициенты которых имеют знак плюс, благоприятно, а имеющих знак минус – неблагоприятно. В соответствии с этим подставим значения параметров в рассматриваемое уравнение.

Таблица 2

**Максимальные и минимальные значения входных параметров**

Параметр	$P_{ср1}$ , атм	$I_{ср1}$ , А	$V_{ср4}$ , мм/с	$P_{макс4}$ , атм	$P_{мин4}$ , атм	$U_{макс4}$ , В
Знак коэффициента регрессии ( $b_i$ )	–	+	+	+	–	–
Максимальное значение	32	513	9,33	129	100	423
Минимальное значение	30	434	1,56	123	60	359
Параметр	$I_{макс4}$ , А	$I_{мин4}$ , А	$T_{нач4}$ , с	$U_{макс5}$ , В	$I_{макс5}$ , А	
Знак коэффициента регрессии ( $b_i$ )	+	–	–	+	–	
Максимальное значение	1174	1075	144,9	105	324	
Минимальное значение	1074	6	99,1	2	6	

При выборе наиболее благоприятных значений параметров усилие изгиба  $P_{изг}$  составляет 8437,37 кН. Расчетное значение  $P_{изг}$  практически в три раза выше среднего. В реальном процессе такие режимы реализовать невозможно, так как на пятом этапе оплавления не происходит, ток протекает уже по всему сечению сварного рельса. В результате нет возможности осуществлять регулировку силы тока оплавления с помощью передвижения подвижной станины (в этом случае сила тока пропорциональна напряжению), поэтому одновременная подставка минимального значения напряжения и максимального значения силы тока некорректна. Подставляя сначала максимальные, а потом минимальные значения напряжения и тока пятого этапа ( $U_{макс5}$ ,  $I_{макс5}$ ), получим наиболее близкие к истине максимальное и минимальное значения усилия при изгибе: 3923,07 и 3828,29 кН соответственно. Таким образом, наличие тока после осадки в свариваемых рельсах положительно влияет на качество сварного соединения. При оптимальных значениях параметров ( $P_{ср1} = 30$  атм;  $I_{ср1} = 513$  А;  $V_{ср4} = 9,33$  мм/с;  $P_{макс4} = 129$  атм;  $P_{мин4} = 60$  атм;  $U_{макс4} = 359$  В;  $I_{макс4} = 1174$  А;  $I_{мин4} = 6$  А;  $T_{нач4} = 99,10$  с;  $U_{макс5} = 105$  В;  $I_{макс5} = 324$  А) прогнозируемые значения по рассматриваемой модели регрессии составляют:  $P_{изг} = 3923,07$  кН;  $f_{пр} = 75,83$  мм.

Для улучшения качества сварного соединения предлагается изменить используемые параметры режима на значения, приведенные выше. Оборудование позволяет установить оптимальные параметры:  $I_1 = 510 \div 520$  А,  $I_{ос} = 1100 \div 1200$  А. При минимальном времени оплавления наблюдаются лучшие показатели качества.

Некоторые из параметров невозможно задать программным путем, для их установки требуется наладка оборудования сварочной машины. Разность параметров  $P_{макс4}$  и  $P_{мин4}$  (четвертого этапа – осадки) говорит о градиенте давления в гидроцилиндрах во время осадки, то есть скорости изменения давления, которая определяет скорость передвижения подвижной станины при осадке. Средние значения скорости передвижения подвижной станины  $V_{ср4}$  варьируются в пределах 1,56 – 9,33 мм/с; этот показатель зависит от состояния гидроаккумулятора. При недостаточном давлении в гидроаккумуляторе необходимо снизить скорость осадки, что может повлечь образование неметаллических включений (оксидов) в металле сварного шва рельсов из электростали, и, соответственно, ухудшение механических свойств сварного стыка.

**Выводы.** На основании математических моделей процесса контактной сварки рельсов определены оптимальные параметры режимов сварки на машине K1100, которые позволяют повысить качество сварного соединения рельсов:  $I_1 = 510 \div 520$  А,  $I_{ос} = 1100 \div 1200$  А,  $T_{нач4} = 100 \div 110$  с,  $V_{ср4} = 9 \div 10$  мм/с. Рассмотрены принципы управления процессом контактной стыковой сварки рельсов. Показаны возможные причины снижения качества сварного стыка рельсов, для устранения которых требуется наладка оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20 – 22.
2. Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report) // Welding International. 1997. Vol. 11. Issue 6. P. 452 – 461.
3. Козырев Н.А. и др. Железнодорожные рельсы из электростали. – Новокузнецк: изд. ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. – 388 с.
4. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // Welding International. 2008. Vol. 22. Issue 5. P. 338 – 341.
5. Шевченко Р.А. Совершенствование технологии сварки рельсовой стали с повышенным содержанием хрома. – В кн.: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Вып. 20. Ч. III. Естественные и технические науки / Под общ. ред. М.В. Темлянцев. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 259 – 261.
6. Irving B., Long Island. Rail Road orders an all-welded fleet // Welding journal. 1997. Vol. 22. Issue 9. P. 33 – 37.
7. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 432 с.
8. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер и др. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

© 2017 г. Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко, С.В. Князев  
Поступила 08 февраля 2017 г.

*Hongyan Cao*<sup>1,2</sup>, *Xizhang Chen*<sup>2</sup>, *Sergey Konovalov*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Jiangsu University

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University

<sup>3</sup>Department of Metals Technology and Aviation Materials

## CORROSION BEHAVIOR OVERVIEW AND ANALYSIS OF CLAM STEEL VS. WELDMENTS IN LIQUID LITHIUM LEAD AT 753K\*

Liquid lithium lead material is one of the most promising concepts for the latest fusion reactor blanket design which has been widely investigated. It uses liquid lithium lead as breeding material, lithium for neutron breeding and lead for producing tritium. China, the European Union, the United States and other members of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) all pay significant attention to the research and development of the liquid lithium lead [1–3]. The main functions of the lithium lead alloy include energy conversion, tritium breed and radiation shield, it is crucial component in order to make fusion energy to achieve the ultimate applications. However, the concern about liquid metal blanket is its compatibility with candidate structural materials [4].

Coolant materials not only suffer high temperature and high pressure, but also bear strong neutron irradiation under complex dynamic condition. Reduced activation ferritic/martensitic (RAFM) steel used as structural materials becomes one of the most attractive designs for ITER-TBM [5]. To keep pace with the research and development of RAFM steel in other countries and meet the demands of constructing the DEMO and the first fusion power plant, China has developed its own low activation martensitic (CLAM) steel one of the RAFM (F82H, JLF-1, EUROFER 97, 9Cr2WVTa) steels, the research and development are done by the fusion design study team from ASIPP (Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences) in cooperation with some institutions and universities in 2001 [6]. CLAM steel serve as nuclear fusion reactor cladding material, is used for manufacturing TBM (Test Blanket Module) internal cooling passages [7], due to the flow channels structure is complex,

different runner sizes and positions make overall molding difficult, welding technique is a major means of connecting these parts. The severe working conditions give strict requirements to CLAM steel and its weldments, therefore, improving the weld joint corrosion resistance is one of key factors in practical application. In this article, previous work on corrosion behavior between base metal and its weldments in static and flowing liquid lithium lead are focused.

### *Weldability of CLAM steel*

Base on the research and design experience of Europe, Japan and United States about RAFM steel, China has developed its own characteristic, composition and performance optimized China Low Activation Martensitic steel. CLAM steel is regarded as one of the most realistic fusion first wall material, because of its excellent performance such as high resistance to irradiation swelling and irradiation embrittlement [8], low thermal expansion coefficient and high temperature mechanical properties compare to traditional austenitic stainless steels [9], Main chemical composition and mechanical properties are shown in Table 1 and Table 2, elements Nb and Mo that cause long time activation under neutron irradiation are replaced by W, V and Ta, the content of Ta is 0,20 % to improve the high temperature performance, Cr content at 9 % provides the lowest DBTT (ductile-brittle transition temperature) in irradiate condition, when the percentage is more than 12 %, delta ferrite will begin to appear, toughness will decrease and the corrosion rate will also be affected. The heat treatment is normalizing at 1253 K for 30 minutes and then cooling in air to room temperature (RT) and tempering at 1033 K for 90 minutes then air cooling to RT [17, 18]. After normalizing, high density dislocation structure is obtained, in subsequent tempering process the dislocation is reduced greatly and precipitated phase formed. These precipitates strongly pin in dislocations, further improve the high temperature mechanical properties, plasticity and toughness.

\* This work is sponsored by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos. 50905079 and 51375216. We deeply acknowledge and appreciate the work our predecessors have done. We appreciate Professor Bruce Madigan and Mr. Nathan Huft from Montana Tech. for their language polishing.



Table 1

**Chemical composition of RAFM steel [10 – 12] (wt %)**

	Cr	W	V	Ta	Mn	C	Ni	Cu	Fe
CLAM	8.91	1.44	0.16	0.20	0.35	0.12	0.043	0.028	Bal
EUROFER 97	8.82	1.09	0.20	0.13	0.47	0.11	0.02	-	Bal
JLF-1	8.93	1.96	0.21	-	0.64	0.10	0.49	-	Bal

Table 2

**CLAM steel mechanical properties between room temperature and 550°C [13 – 16]**

	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation at fracture/%	Reduction of area/%	$T_{DBTT}/^{\circ}\text{C}$
RT	512	660	23	77	-52
550°C	340	365	24	84	-

Microstructure is observed by optical microscope (OM) as shown in Fig. 1 [19]. Fig. 1 (a) shows that base metal microstructure distribution is uniform, grains refinement and no delta ferrite is observed, which means that base metal is fully tempered. After welding, microstructure is unevenly distributed, grain size become coarse as shown in Fig. 1 (b).

Suitable fusion welding technique for CLAM steel include gas tungsten arc welding (GTAW), laser beam welding (LBW), plasma arc welding (PAW), ultrasonic TIG welding and hot isostatic pressure diffusion welding (HIP) [20, 21]. The welding heat input, weld metal remelting and crystallization, heat affected zone (HAZ) grain growth, delta ferrite appear between the prior austenite grain boundaries have seriously affected the performance of the weldment [22 – 24]. These changes make weld joints prone to phenomenon of weld zone hardening, heat affected zone softening, and cold cracking. The advantages of GTAW

method are: weld zone is well protected, heat input is concentrated and welding deformation is small as well as easily realize mechanization and automation. Beijing university of science and technology had done Y-type and double Y-type grooves welding tests on 13 mm thick CLAM steel plates using GTAW method [25], the study find that heat affected zone is slightly large, from fusion zone to base metal, hardness distribution firstly decrease and then slightly increase. GTAW welding of 4 mm thick CLAM steel is conducted with the current 96A and the speed is about 5cm/min in Jiangsu university [26], the results show that weld zone hardness values are on the high side, heat affected zone near the base metal existed a narrow softening area, microstructures are obvious lath character tempered martensite.

**Liquid metal lithium lead loop**

A series of experimental devices (heat convection and forced convection loop) on materials cor-

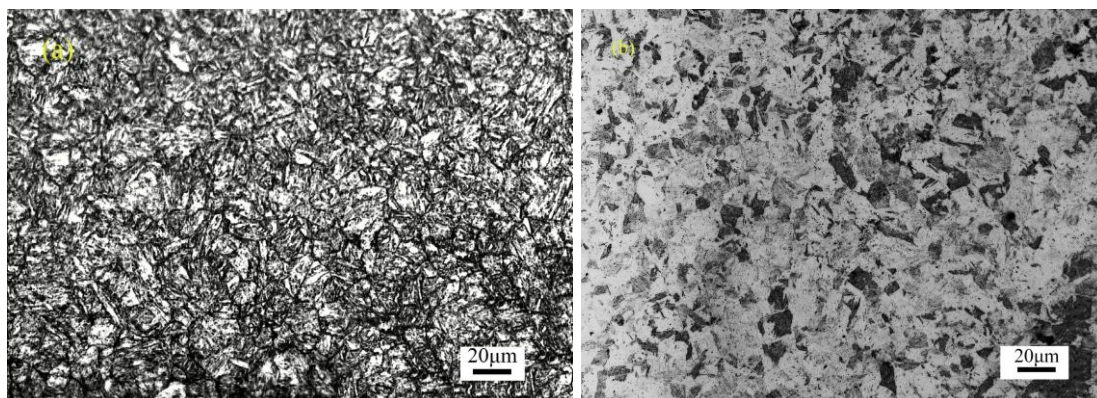


Fig. 1. Microstructure of base metal (a) and the weld (b) [19]



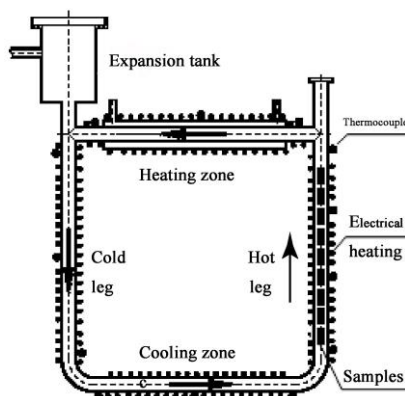


Fig.2. Schematic diagram of DRAGON-I loop. [2, 32]

rosion experiments in liquid lead lithium have been designed all over the world, and RAFM steel compatibility with liquid lithium lead is evaluated and validated [27 – 29]. In China FDS team [30, 31] has successfully developed the first liquid lithium lead corrosion experiment loop DRAGON-1, which the material is 316 L stainless steel, its inner diameter is 22 mm and outside diameter 32 mm, partial schematic diagram as shown in Fig. 2. The whole circuit device main body consists of hot section (to place samples), cold section, heating side, cooling side and the expansion tank. Cold and hot section temperature were set at 693 K and 753 K, heating side temperature is heated from 693 K to 753 K continuously, while cooling side temperature is designed from 753 K drop down to 693 K. The difference of temperature within the hot and cold section causes the lithium lead density distribution is non-uniform, thus forming heat convection circulation under gravity.

When operating the circuit, liquid lithium lead flow into the loop from expansion tank at the top, heat convection circulation flow between hot section and cold section, the velocity is about 0.08 m/s. After the corrosion experiments, samples are taken out and cleaned in the solution  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (1:1:1) to remove the residual layers and other corrosion compounds on the sur-

faces until the weight remain constant, the samples then are grounded using sandpapers with a grids order of 180, 360, 600, 800, 1000, 1200 and mechanically polished by diamond polishing agent with a diameter of 0,5 – 1,25  $\mu\text{m}$ . After fine grinding and polishing, the surfaces are smooth enough to observe subtle signs of corrosion. Sample surface and the cross section are tested by XRD, EDS and SEM analysis.

**CLAM steel vs. weldment corrosion rate**

Weight loss and corrosion depth following with time are usually used to evaluate the corrosion rate. Corrosion loss is determined by weight measurements using electro balance with an accuracy of 0,01 mg. Fig. 3 shows the weight loss and time curve of low activation ferritic/martensitic in flowing LiPb at 753 K, the straight line slope between two points represents the corrosion rate. CLAM steel corrosion rate exhibits a linear increase close to 2500 hours, the weight loss is 1,18 mg/cm<sup>2</sup> as the corrosion time reaches 5000 hours. In the early corrosion period, due to the pre-existing of passivation layers, the weight loss is small and specimens do not enter the stable corrosion stage, until passivation layers lose protection effect. Eurofer97 and JLF-1 also show better compatibility with liquid LiPb in dynamic conditions.

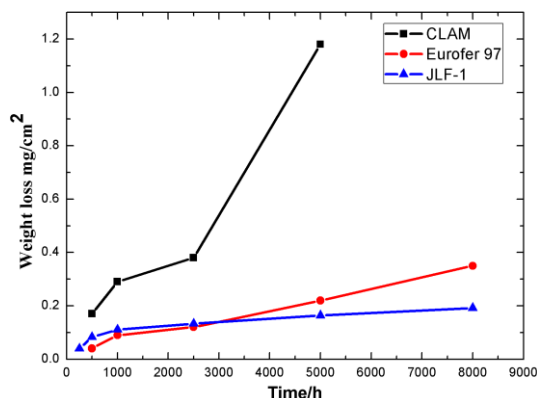


Fig. 3. Weight loss of low activation ferritic/martensitic steel as a function of time (Data are from Ref. 2, 4, 33, 34)

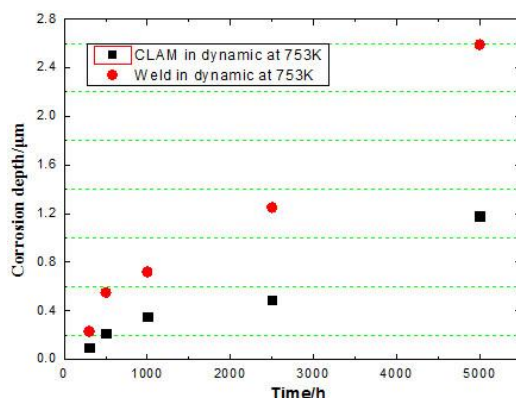


Fig.4. Corrosion rate comparison between CLAM steel and its weldments as a function of time (Data are from Ref. 1, 36, 37, 40)

Corrosion depth is influenced by various environmental parameters such as temperature, flow velocity and time [35]. The depth of the weldments increases with time and the corrosion rate is higher than that of base metal as shown in Fig. 4. When the exposing time was 2500 hours, corrosion depth of base metal is 0,5 µm and weld is 1,25 µm in dynamic conditions. Corrosion depth for 5000 h is calculated according to the previous existed corrosion rate. It is believed that the coarse martensite lath, residual stress, and high heat input under welding condition make the weldment corrosion resistance lower than base metal. If the high temperature leads to serious corrosion, the effect of flowing rate is greater. Therefore, the weld corrosion rate becomes more deserving research for long time under flowing LiPb conditions. Increasing the weldment corrosion resistance has a very important practical significance in order to improve the service life of structural blanket materials.

According to the above cases, if a nuclear reactor is designed for 100 years of operation, the CLAM steel base metal weight loss is about 206,74 mg/cm<sup>2</sup>, the weld corrosion depth is about 438 µm, the numerical values are acceptable. That is to say China low activation martensite steel and its weld not only meet the requirements of the basic performance for common structural materials, and ensure the normal operation under service conditions.

#### ***CLAM steel vs. weldment surface investigation***

Compared corrosion tests between CLAM steel and 316L stainless steel at 753 K with flow velocity 0,08 m/s in dynamic conditions for 500 h were conducted in the year 2005 by FDS team for the first time, SEM observation and EDS analysis had showed that CLAM steel corrosion resistance was better, the surface morphology and composition almost had no change [38]. Then longer time experiments of 2500 h in flowing LiPb were carried out, corrosive attack took place along the en-

tire surface, the corrosion surface was inhomogeneous and started with the destroy of oxide layers formed during the heat treatment or specimens preparation process.

Chen et al [36] have studied and analyzed the corrosion behavior of CLAM steel under dynamic condition at 753 K in liquid lithium lead metal. Specimens surface morphology, chemical composition and corrosion rate had been observed and calculated. When the corrosion time approached 3000 hours, more than fifty percent of the specimen surface did not suffer attack, the probable reason was that the dense oxide layers protected the internal metal from dissolving into flowing lithium lead alloy. Analysis showed that no LiPb diffusion was detected on the surface and the maybe presence of ferritic phase reduced the corrosion resistance. Specimens that were exposed nearly 8000 hours exhibited irregular corrosion and the depth was approximately 15 µm as shown in Fig. 5. EDS line scan found major elements of Fe and Cr decreased greatly in the corrosion layer and the main difference was high oxygen content in the corrosion zone. Due to the diffusion effect, carbon element accumulated on the surface. As time changed longer, a newly formed chromium oxide layer with high level of oxygen began to appear under the corrosion layer, the thickness was about 10 µm. That was supposed, when exposure time was long enough, elements dissolving in liquid metal and the corrosion attack continued entering into the deeper matrix led to the destroy of the base metal and weight loss [39, 40]. Elements of Fe and Cr reduced near surface, the depleted layers thickness was around a few microns, elements such as oxygen, tungsten have improved obviously. Even though, the existence of protective layers did not prevent the metal from dissolving into liquid metal.

Due to the influence of weld heat input, heat affected zone (HAZ) near the fusion line or over-heat region exhibited grain coarse, ultimately formed the coarse lath martensite structure, BSE

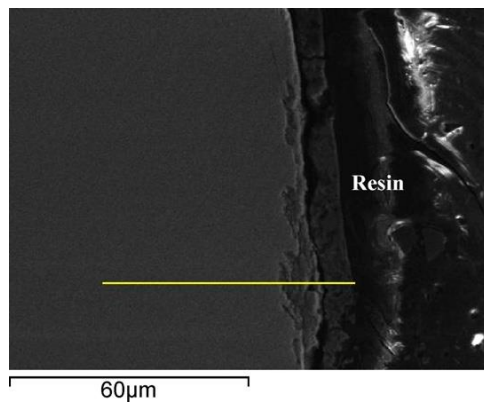
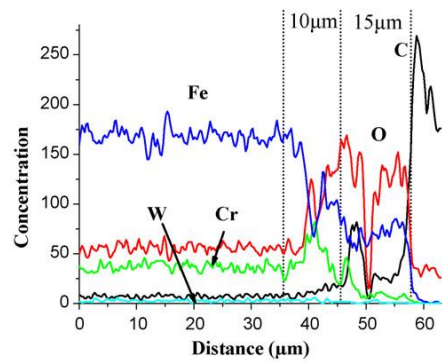


Fig. 5. Cross-section and EDS analysis after 8000 h exposure [38]



images as shown in Fig. 6. From weld metal (WM) to the coarse-grained heat affected zone (CGHAZ), uniform distributed micro-structure transformed to rough group. No carbide precipitations were found along the grain boundaries either in CGHAZ or fusion zone (FZ) of as-weld joint. Weld metal melting and solidification lead to the formation of similar casting structure. Because of high heat input and thermal cycle during GTAW process, the stress distribution was not uniform. The carbide particles or oxide scale formed on the original austenite grain boundary or the martensite lath boundary, chromium content was significantly reduced in this region, thus forming the easy corrosion area.

Microstructure of CLAM steel weld is usually coarse martensite and it has large quantities of residual stress, these factors generally have a great tendency to increase the corrosion attack, making the weldments become the weak area of the materials. According to Chen [40, 42] study, the test temperature was 753K with the flowing velocity 0,08 m/s, when the exposure time was less than 1000 hours, there was no lithium lead penetrating into CLAM steel weldment and the corrosion surface was uniform. It could be concluded that corrosion resistance of weld state was far lower than the tempered state of base metal, the coarse martensite lath in fusion zone gave rise to a high tend of corrosion.

Fig. 7. was XRD images after 3000 h exposure between base metal and weldment, it showed that curve peaks roughly in the same position of two pictures, which indicated that the main composition and phase had not changed, because there presented mostly tempered lath martensite and coarse martensite on the surface. The intensity of weldment at  $2\theta$  approach 45 degree was about 6500, while the base metal was 8000 [43, 44]. Fig. 8. showed corrosion morphology of CLAM steel GTAW weld joint, pitting corrosion could be observed clearly in Fig. 8, a. Fig. 8, b revealed when corrosion time was 1000 hours, corrosion degree was more serious than that of 500 hours. The gully like morphology had a parallel arrangement, the distances between the gullies were about 0,5 – 1  $\mu\text{m}$ , a little thinner than the width of martensite lath. Weldment surfaces showed uniform corrosion and there were no lithium lead diffusing into internal metal, element of chromium between martensite laths separated out in form of chromium oxide or chromium carbide, at the places the original austenite grain boundary or the martensite lath were coarse produced chromium depleted area [42]. It was processing orientation and direction of martensite lath (DML) which were not absolutely vertical, that caused the chromium depleted area became more prone to corrosion.

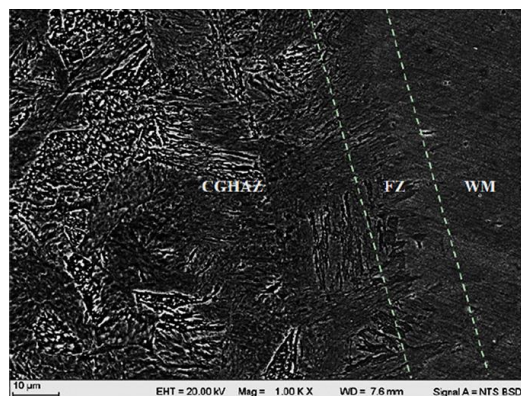


Fig. 6. BSE images near the CLAM weld [41]

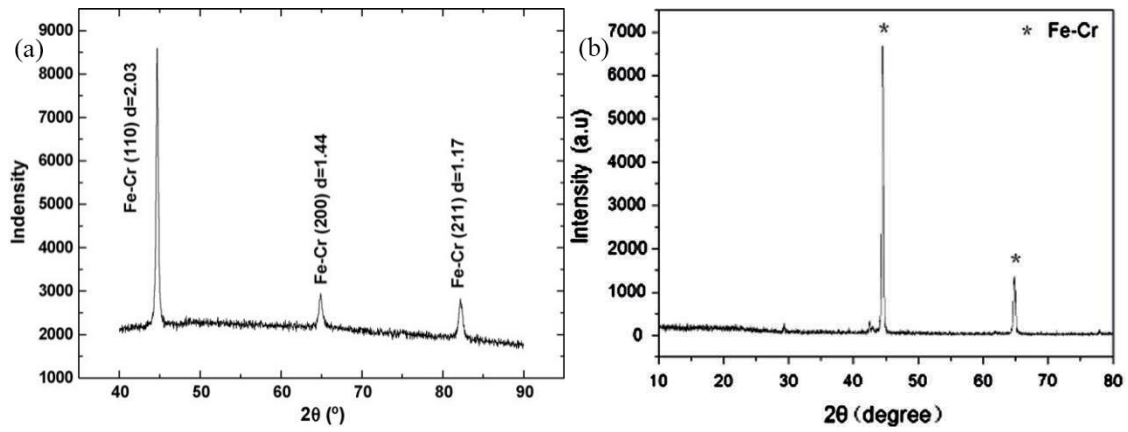


Fig. 7. XRD images after 3000 h exposure (a) base metal (b) weldment [43, 44]

When the direction of the martensite lath and the specimen surface presented small angle or near the grain boundary were more likely to become easy corrosion area. From the view of surface morphology, the easy corrosion area usually appeared along martensite lath. When exposing to liquid lithium lead, CLAM steel weldment enter into the stage of stable corrosion, at the same time there were more easy corrosion areas in contact with liquid metal, where as a result the initial corrosion rate was faster, weight loss was larger. Easy corrosion area presented peak and valley morphology with ups and downs. As long as the time increased, corrosion surface moved further inward to the internal steel.

**Corrosion mechanism analysis**

Dissolution and mass migration is the basic form for liquid metal corrosion, due to the difference between solubility and dissolution rate, elements selective dissolution occur in the liquid metal, mass migration refer to the directional movement and diffusion of metal material from one area to another. Based on previous research and analyses, the main corrosion mechanism for CLAM steel and its weldments in liquid lithium lead is the metal elements dissolving into the liq-

uid LiPb and liquid metal penetrating into the solid structure materials [45]. Corrosion attack take place as a function of geometry, microstructure and composition. Prior precipitated austenite, martensite lath boundaries and areas with residual stress suffer severe corrosion [44]. Corrosion attack firstly dissolves pre-existing oxide layers formed in the process of tempering or heat treatment, the destruction requires a relatively long time, which is referred as the incubation period, and then corrosion continue to dissolve internal matrix and micro-alloy elements as shown in Fig. 9. The narrow yellow line stands for oxide layers, which is richer in chromium and depleted in metal iron, indicates that the oxide layers was likely  $Cr_{23}C_6$  or  $Cr_2O_3$ . However, element of chromium in the matrix is depleted by diffusing to the liquid LiPb or forming the compounds [46, 47]. Elements diffusion to liquid metal as shown in Fig. 9, b and Fig. 9, c, the elements directional migration produce easy corrosion area and phase transformation. When the oxide layers are damaged, liquid LiPb alloy begin to permeate into base metal, reduce corrosion resistance of micro-structure, increase the weight loss of material and lead to severe corrosion.

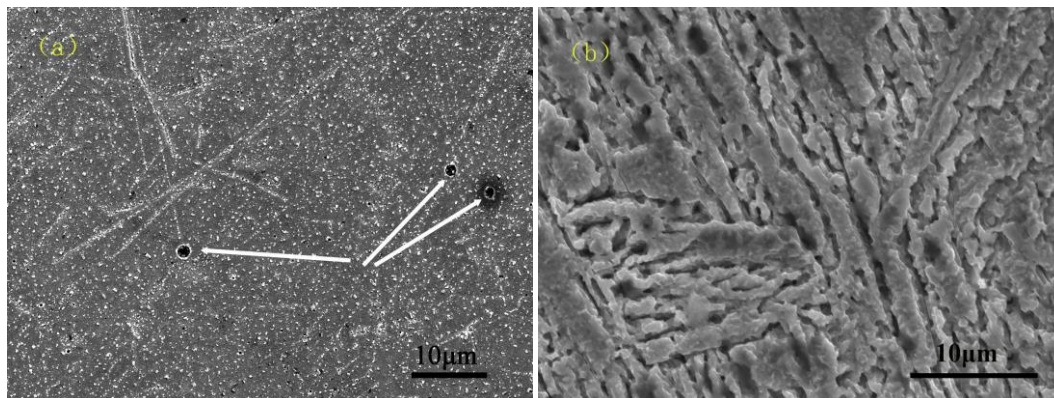


Fig. 8. Micrograph of CLAM steel weldments (a) after 500 h (b) after 1000 h [40]



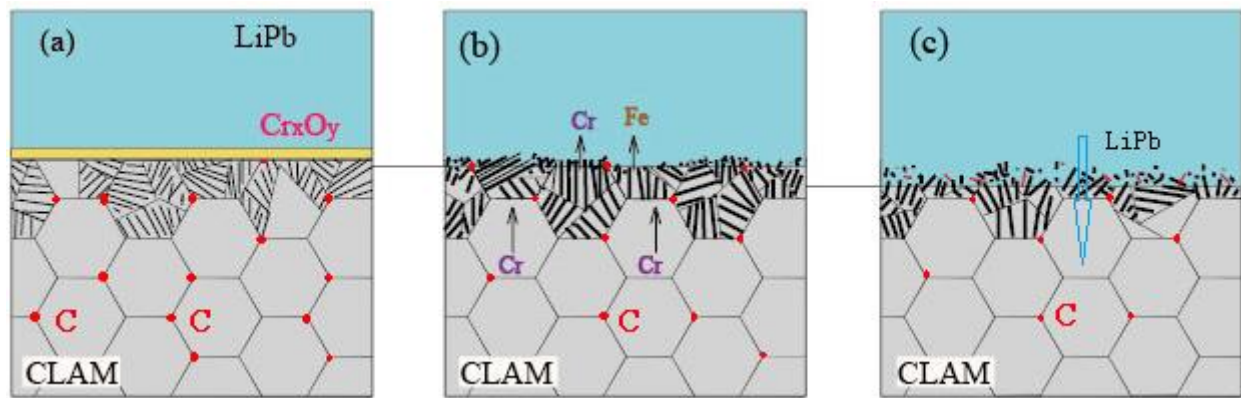


Fig.9. Corrosion behavior in flowing liquid LiPb (a) destroy of original oxides layer (b) alloy element dissolving (c) continuous dissolving and LiPb permeating

Compared with tempering treated CLAM steel, corrosion behavior of welding state is more serious, the probable reason may be related to the composition distribution and microstructure transformation. Base metal microstructure is mostly tempered lath martensite, filled with equiaxed sub-grains and a number of carbides precipitate on prior austenite grain boundaries, sub-grains boundaries and within martensite laths during tempering. While weld and heat affected zone microstructure is coarse, uneven distribution, similar to casting martensite, results in the decrease of corrosion resistance. Chemical composition differences between material internal and surface or grain boundary impurities and the existence of internal stress, component elements prior dissolving in liquid metal or liquid metal permeating along the grain boundary lead to grain boundary corrosion. Flow rate is too high or bend a sharp turn caused by liquid metal partial vaporization, similar to vacuum bubble forming, the surrounding liquid metal at high velocity flow into the bubbles impacting the material surface, as a result pitting occurs. These factors may cause serious corrosion, which needs further research in the subsequent experiments.

**Conclusion.** This paper provides a brief analysis on CLAM steel and its weldments corrosion behavior in liquid lithium lead at 753 K as well as a review of composition transmission, microstructures transformation and corrosion mechanism. Corrosion behavior under different temperature, flow rate and time in liquid metal need further study and conclusions are as follows:

CLAM steel corrosion behavior in flowing lithium lead at 753 K is overviewed, corrosion mechanism between CLAM steel and its weldment is concluded, the corrosion resistance of tempered base metal is superior to welds.

Corrosion rate exhibits a linear growth, weight loss increases with time, when the time reaches 5000 h, the weight loss is about 1,18 mg/cm<sup>2</sup>,

while the weldments weight loss is two times greater than that of the base metal, corrosion loss and depth are calculated for a long run.

Compositions and microstructures are compared, base metal surface is mostly presented by tempered lath martensite and weld zone microstructure is coarse, similar to casting martensite, corrosion resistance of coarse martensite is not as good as tempered one. XRD images showed that the peaks are rough at the same position (2 $\theta$ ) on the corrosion surface, weld surface has certain chromium content decreased, peaks intensity is weaker than in the base metal.

The presence of passivation (Fe – Cr oxides) layers has delayed wetting effect, which can effectively protect the internal base metal, reducing the corrosion rate at an early stage. Material elements dissolving and migrating into the liquid lithium are the main cause of the corrosion.

## REFERENCES

1. Zhiqiang Zhu, Maolian Zhang, Sheng Gao, Yong Song, Chunjing Li et al, Preliminary experiments on the corrosion of CLAM steel in flowing eutectic LiPb. *Fusion Engineering and Design*, 200). Vol. 84 (1). P. 5-8.
2. Maolian Zhang, FDS Team. Corrosion experiment for CLAM and SS316L in liquid LiPb loop of China. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, Vol. 80. P. 203-206.
3. Yanfen Li, Hiroaki Abe, Takuya Nagasaka, Takeo Muroga, Masatoshi Kondo. Corrosion behavior of 9Cr-ODS steel in stagnant liquid lithium and lead-lithium at 873 K. *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 443. P. 200-206.
4. Qunying Huang, Sheng Gao, Zhiqiang Zhu, Maolian Zhang, et al. Progress in compatibility experiments on lithium–lead with candidate structural materials for fusion in China.

- Fusion Engineering and Design, 2009. Vol. 84 (2-6). P. 242-246.
5. Zhihui Guo, Qunying Huang, Zilin Yan, Yong Song, Zhiqiang Zhu, et al. Compatibility of atmospheric plasma sprayed  $Al_2O_3$  coatings on CLAM with liquid LiPb. Fusion Engineering and Design. 2010. Vol. 85. P. 1469–1473.
  6. Qunying Huang, Chunjing Li, Qingsheng Wu, Shaojun Liu, Sheng Gao, et al, Progress in development of CLAM steel and fabrication of small TBM in China, Journal of Nuclear Materials, 2011. Vol. 417 (1-3). P. 85-88.
  7. Ningshen S., Sakairi M., Suzuki K., Ukai S. The corrosion resistance and passive film compositions of 12% Cr and 15% Cr oxide dispersion strengthened steels in nitric acid media. Corrosion Science. 2014. Vol. 78. P. 322-334.
  8. Lu Y.H., Wang Z.B., Song Y.Y., Rong L.J. Effects of pre-formed nanostructured surface layer on oxidation behaviour of 9Cr2WVTa steel in air and liquid Pb-Bi eutectic alloy, Corrosion Science. 2016. Vol. 102. P. 301-309.
  9. Xizhang Chen, Yuming Huang, Bruce Madigan, Jianzhong Zhou, An overview of the welding technologies of CLAM steels for fusion application. Fusion Engineering and Design. 2012. Vol. 87. P. 1639-1646.
  10. Konys J., Krauss W., Zhu Z. b, Huang Q. Comparison of corrosion behavior of EUROFER and CLAM steels in flowing Pb-15.7Li. Journal of Nuclear Materials. 2014. Vol. 455. P. 491-495.
  11. Qi Xu, Masatoshi Kondo, Takuya Nagasaka, Takeo Muroga, Masaru Nagura, Akihiro Suzuki, Corrosion characteristics of low activation ferritic steel, JLF-1, in liquid lithium in static and thermal convection conditions. Fusion Engineering and Design. 2008. Vol. 83. P. 1477-1483.
  12. Yanyun Zhao, Xiangwei Zhai, Shaojun Liu , Chunjing Li, Qunying Huang, High cycle fatigue properties of CLAM steel at 723K and 823K. Fusion Engineering and Design. 2015. Vol. 100. P. 608-613.
  13. Shenghu Chen, Lijian Rong, Effect of silicon on the microstructure and mechanical properties of reduced activation ferritic/martensitic steel. Journal of Nuclear Materials. 2015. Vol. 459. P. 13-19.
  14. Lixin Huang, Xue Hu, Chunguang Yang, Wei Yan, Furen Xiao, Yiyin Shan, Ke Yang, Influence of thermal aging on microstructure and mechanical properties of CLAM steel. Journal of Nuclear Materials. 2013. Vol. 443. P. 479-483.
  15. Xue Hu, Lixin Huang, Wei Yan, Wei Wang, Wei Sha, Yiyin Shan, Ke Yang, Low cycle fatigue properties of CLAM steel at 823K. Materials Science&Engineering A. 2014. Vol. 613. P. 404-413.
  16. Qunying Huang, FDS Team, Development status of CLAM steel for fusion application. Journal of Nuclear Materials. 2014. Vol. 455 (1-3). P. 649-654.
  17. Qunying Huang, Qingsheng Wu, Shaojun Liu, Chunjing Li, Bo Huang, L. Peng et al. Latest progress on R&D of ITER DFLL-TBM in China. Fusion Engineering and Design. 2011. Vol. 86. P. 2611-2615.
  18. Qunying. Huang, Chunjing. Li, Y. Li, M. Chen, Maolian. Zhang, L. Peng, Zhiqiang. Zhu, Yong. Song, Sheng. Gao. Progress in development of China Low Activation Martensitic steel for fusion application, Journal of Nuclear Materials. 2007. Vol. 367-370. P. 142-146.
  19. Xizhang Chen, Yuanyuan Fang, Shuyan Zhang, Joe F. Kelleher, Jianzhong Zhou. Effects of LSP on micro-structures and residual stresses in a 4 mm CLAM steel weld joints. Fusion Engineering and Design. 2015. Vol. 94. P. 54–60.
  20. Chunjing Li, Qunying Huang, Qingsheng Wu, Shaojun Liu, Yucheng Lei, et al. Welding techniques development of CLAM steel for Test Blanket Module. Fusion Engineering and Design. 2009. Vol. 84. P. 1184-1187.
  21. Yuming Huang, Xizhang Chen, Zheng Shen, Bruce Madigan, Lei Yucheng, Jianzhong Zhou, Measurement and analysis of SHCCT diagram for CLAM steel. Journal of Nuclear Materials. 2013. Vol. 432. P. 460-465.
  22. Xizhang Chen, Yuming Huang, Zheng Shen, J Chen, Lei Yucheng, Jianzhong Zhou, Effect of thermal cycle on microstructure and mechanical properties of CLAM steel weld CGHAZ. Science and Technology of Welding and Joining. 18 (4) 272-278.
  23. Xizhang Chen, Zheng Shen, Jingjun Wang, et al, Effects of an ultrasonically excited TIG arc on CLAM steel weldjoints. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 60 (5-8). P. 537-544.
  24. Qingsheng Wu, Shuhui Zheng, Shaojun Liu, Chunjing Li. Qunying Huang. Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of electron beam welded joints for CLAM steel, Journal of Nuclear Materials. 2013. Vol. 442. P. 512-517.

25. Zhizhong Jiang, Litian Ren, Jihua Huang, Xin Ju, Huibin Wu, Qunying Huang, Yican Wu, Microstructure and mechanical properties of the TIG welded joints of fusion CLAM steel. *Fusion Engineering and Design*. 2010. Vol. 85. P. 1903-1908.
26. Yucheng Lei, Qiang Zhu, Ling Zhang, Kangjia Gu, Xin Ju, Simulation on the welding of CLAM steel. *Fusion Engineering and Design*. 2010. Vol. 85. P. 1503-1507.
27. Konys J., Krauss W., Voss Z., Wedemeyer O.. Corrosion behavior of EUROFER steel in flowing eutectic Pb-17Li alloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2004. Vol. 329-333. P. 1379-1383.
28. Konys J., Krauss W., Voss Z., Wedemeyer O. Comparison of corrosion behavior of bare and hot-dip coated EUROFER steel in flowing Pb-17Li. *Journal of Nuclear Materials*. 2007. Vol. 367-370. P. 1144-1149.
29. Konys J., Krauss W., Novotny J., Steiner H., Voss Z., Wedemeyer O. Compatibility behavior of EUROFER steel in flowing Pb-17Li, *Journal of Nuclear Materials*. 2009. Vol. 386-388. P. 678-681.
30. Hongli Chen, Tao Zhou, Zhiyi Yang, Ruojun Lü, Zhiqiang Zhu, Mingjiu Ni, Magnetohydrodynamic experimental design and program for Chinese liquid metal LiPb experimental loop DRAGON-IV. *Fusion Engineering and Design*. 2010. Vol. 85. P. 1742-1746.
31. Yican Wu, FDS Team. Overview of liquid lithium lead breeder blanket program in China. *Fusion Engineering and Design*. 2011. Vol. 86. P. 2343-2346.
32. Sheng Gao, Maolian Zhang, Zhiqiang Zhu, Qunying Huang, Chunjing Li, et al. Preliminary experimental study on the corrosion of China low activation martensitic steel in liquid lithium lead. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*. 2007. Vol. 27. P. 51-54.
33. Masatoshi Kondo, Minoru Takahashi, Teruya Tanaka, Valentyn Tsisar, Takeo Muroga, Compatibility of reduced activation ferritic martensitic steel JLF-1 with liquid metals Li and Pb-17Li. *Fusion Engineering and Design*. 2012. Vol. 87. P. 1777-1787.
34. Protsenko P., Terlain A., Jeymond M., Eustathopoulos N. Wetting of Fe-7.5%Cr steel by molten Pb and Pb-17Li. *Journal of Nuclear Materials*. 2002. Vol. 307-311. P. 1396-1399.
35. Konys J., Krauss W., Steiner H., Novotny J., Skrypnik A. Flow rate dependent corrosion behavior of Eurofer steel in Pb-15.7Li. *Journal of Nuclear Materials*. 2011. Vol. 417. P. 1191-1194.
36. Qunying Huang, Maolian Zhang, Zhiqiang Zhu, Sheng Gao. Corrosion experiment in the first liquid metal LiPb loop of China. *Fusion Engineering and Design*. 2007. Vol. 82. P. 2655-2659.
37. Sheng Gao, Qunying Huang, Zhiqiang Zhu, Zhihui Guo, Xinzhen Ling, Yaping Chen, Corrosion behavior of CLAM steel in static and flowing LiPb at 480°C and 550°C. *Fusion Engineering and Design*. 2011. Vol. 86. P. 2627-2631.
38. Yaping Chen, Qunying Huang, Sheng Gao, Zhiqiang Zhu, Xinzhen Ling, et al, Corrosion analysis of CLAM steel in flowing liquid LiPb at 480°C. *Fusion Engineering and Design*. 2010. Vol. 85. P. 1909-1912.
39. Glasbrenner H., Konys J., Röhrig H.D., Stein-Fechner K., Voss Z. Corrosion of ferritic-martensitic steels in the eutectic Pb-17Li. *Journal of Nuclear Materials*. 2000. Vol. 283-287. P. 1332-1335.
40. Xizhang Chen, Zheng Shen, Xing Chen, Yucheng Lei, Qunying Huang. Corrosion behavior of CLAM steel weldment in flowing liquid Pb-17Li at 480°C. *Fusion Engineering and Design*. 2011. Vol. 86. P. 2943-2948.
41. Junyu Zhang, Bo Huang, Qingsheng Wu, Chunjing Li, Qunying Huang. Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of CLAM/316L dissimilar joint. *Fusion Engineering and Design*. 2015. Vol. 100. P. 334-339.
42. Xizhang Chen, Zheng Shen, Peng Li, Bruce Madigan, Yuming Huang, Yucheng Lei, et al, Compatibility of CLAM steel weldments with static LiPb alloy at 550°C. *Fusion Engineering and Design*. 2012. Vol. 87. P. 1565-1569.
43. Shaojun Liu, Qunying Huang, Chunjing Li, Bo Huang, Influence of non-metal inclusions on mechanical properties of CLAM steel, *Fusion Engineering and Design*, 2009. Vol. 84. P. 1214-1218.
44. Xizhang Chen, Qibing Yuan, Bruce Madigan, Wei Xue. Long-term corrosion behavior of martensitic steel welds in static molten Pb-17Li alloy at 550°C. *Corrosion Science*. 2015. Vol. 96. P. 178-185.
45. Yanfen Li, Hiroaki Abe, Takuya Nagasaka, Takeo Muroga, Masatoshi Kondo, Corrosion behavior of 9Cr-ODS steel in stagnant liquid lithium and lead-lithium at 873 K. *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 443. P. 200-206.
46. Carsten Schroer, Olaf Wedemeyer, Josef Novotny, Aleksandr Skrypnik, Jürgen Konys, Selective leaching of nickel and chromium

from Type 316 austenitic steel in oxygen-containing lead-bismuth eutectic (LBE). Corrosion Science. 2014. Vol. 84. P. 113-124.

47. Yanfen Li, Hiroaki Abe, Takuya Nagasaka, Takeo Muroga, Masatoshi Kondo. Corrosion behavior of 9Cr-ODS steel in stagnant liquid lithium and lead–lithium at 873 K. Journal of

Nuclear Materials. 2013. Vol. 443. P. 200–206.

© 2017 г. Hongyan Cao,  
Xizhang Chen, Sergey Konovalov  
Поступила 03 февраля 2017 г.

УДК 669:504.062.2/47

*С.Н. Кузнецов, И.А. Рыбенко, Е.В. Протопопов, М.В. Темляцев, С.В. Фейлер*

Сибирский государственный индустриальный университет

### **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОМ ОКУСКОВАНИИ КОНВЕРТЕРНЫХ ШЛАМОВ**

Анализ перспектив развития сталеплавильного производства показывает, что в настоящее время наблюдается отчетливая тенденция более широкого применения при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах и конвертерах подготовленных шихтовых материалов, характерными представителями которых являются синтиком и оксидно-угольные брикеты [1, 2]. Фактически такие подготовленные шихтовые материалы представляют собой композиции из Fe – C – O-содержащих природных и техногенных материалов, в том числе окалины, шламов, плавильной пыли, коксовой мелочи и т.п. Синтетические композиционные материалы, являющиеся компонентами шихты, имеют определенный гранулометрический состав и форму. Весьма важным фактором является то, что Fe – C – O-содержащие композиционные шихтовые материалы кардинально меняют течение физико-химических процессов в сталеплавильной ванне. Это происходит благодаря наличию в их составе окислительных и восстановительных компонентов, которые соответствующим образом проявляются в различные периоды плавки [1].

В оксидноугольных брикетах восстановитель и окислитель смешаны до начала взаимодействия и, таким образом, подготовлены к реакции между углеродом и кислородом [1]. При этом мелкодисперстные железо- и углеродсодержащие компоненты обладают развитой поверхностью реагирования, что значи-

тельно интенсифицирует процессы восстановления.

К одной из разновидностей подготовленных или композиционных шихтовых материалов можно отнести феррококс и феррококс-вые брикеты [3 – 5]. Концепция производства феррококса разработана еще в 30-х годах прошлого века и была ориентирована на спекание железорудной пыли, непригодной для плавки в доменных печах, с жирным или битуминизированным углем в коксовых батареях. Феррококс можно классифицировать как железоуглеродную композицию, прошедшую тепловую обработку вне плавильного агрегата. Феррококс – композиционный материал, содержащий в основном восстановленное железо и углерод. В работе [6] представлены результаты разработки основ технологии производства феррококса с применением адсорбционного обезвоживания и термохимического окускования конвертерных шламов. Завершающей стадией производства феррококса по такой технологии является термохимический способ окускования шлама в процессе его коксования в смеси со спекающимися углями. На этой стадии происходит восстановление железа из его оксидов. При этом практический интерес представляет определение термодинамических условий, необходимых для восстановления железа, и границ концентрационных областей, позволяющих рационализировать состав сырьевой смеси и температурный режим процесса.



### Характеристики угольных концентратов

Угольный концентрат	Теханализ				Пластометрия		Петрография		
	W, %	A <sup>d</sup> , %	V <sup>daf</sup> , %	S <sup>d</sup> , %	X, мм	Y, мм	Vt, %	S <sub>r</sub>	R
ГЖ и Ж	10,5	7,8	38,0	0,56	17	24	85,0	0,560	0,864
Ж	8,6	8,1	38,2	0,67	-2	34	93,0	0,045	0,853

В настоящей работе с использованием программного комплекса «Терра», созданного в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана [7], проведено термодинамическое моделирование восстановления железа из конвертерных шламов. Программа позволяет производить расчеты равновесного состава фаз и термодинамических свойств произвольных систем при химических и фазовых превращениях. Реализованный метод, сущность которого заключается в нахождении максимума энтропии системы как функции состава и температуры [7], основан на вариационных принципах термодинамики.

Проведено исследование процесса восстановления железа из конвертерного шлама следующего химического состава: 64,17 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,82 % FeO; 4,60 % MgO; 16,71 % CaO; 5,76 % SiO<sub>2</sub>; 0,19 % K<sub>2</sub>O; 0,07 % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 0,10 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

0,63 % C; 1,11 % ZnO; 0,06 % CuO; 0,11 % PbO; 1,08 % MnO; 1,93 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,88 % Na<sub>2</sub>O; 0,32 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 0,21 % TiO<sub>2</sub>; 0,24 % S (по массе).

В качестве восстановителей использовали концентрат ЦОФ «Кузнецкая», состоящий из 50 % газового жирного (ГЖ) и 50 % жирного (Ж) углей, а также концентрат угля марки Ж Межэгейского месторождения. Характеристики угольных концентратов приведены в таблице.

Исследование влияния расхода восстановителя на параметры процесса проводили в модельной системе, представленной 100 кг конвертерного шлама. Количество угольного концентрата варьировали в диапазоне 5 – 100 кг. При температуре 1100 °С рассчитывали равновесные составы. Результаты расчетов для процесса восстановления концентратами ЦОФ «Кузнецкая» ГЖ и Ж, а также угля марки Ж Межэгейского месторождения приведены на рис. 1.

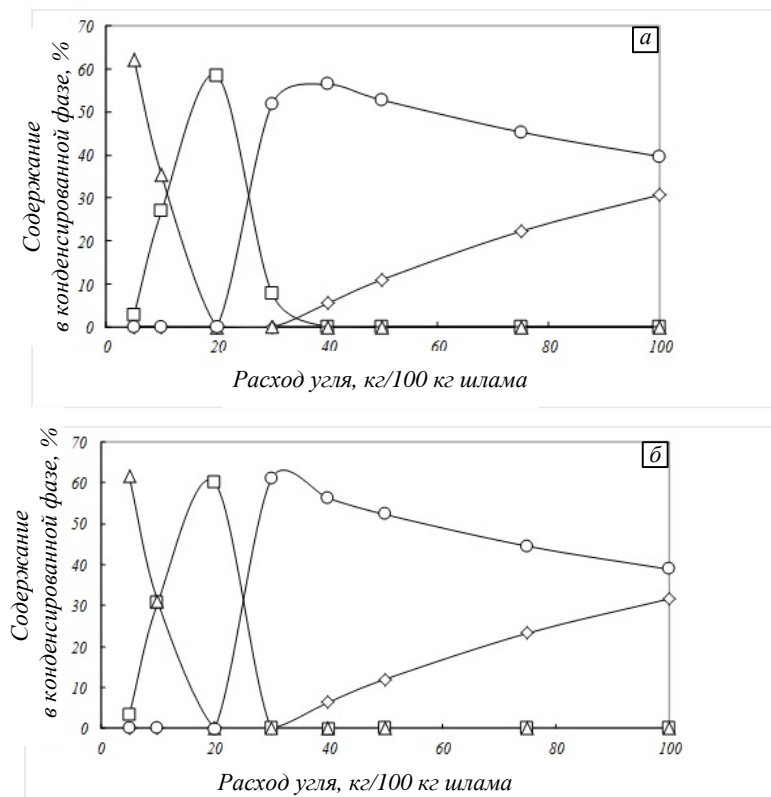


Рис. 1. Зависимость состава конденсированной фазы процесса восстановления конвертерного шлама от расхода концентрата углей марок ГЖ и Ж Кузнецкой ЦОФ (а) и угля марки Ж Межэгейского месторождения (б):  
 ◇ – C; □ – Fe; Δ – FeO; ○ – Fe<sub>3</sub>C

Исследуемые концентраты как восстановители имеют аналогичные свойства, которые определяются их составом. Полное восстановление железа происходит при расходе угольного концентрата 20 кг/100 кг шлама; при этом значении содержание восстановленного железа максимально и для концентрата ЦОФ «Кузнецкая» ГЖ и Ж составляет 58,5 %, а для угля марки Ж Межэгейского месторождения – 60,1 %. Оксид железа отсутствует. При увеличении расхода восстановителя концентрация железа снижается, содержание его карбида растет. При расходе концентрата ЦОФ «Кузнецкая» ГЖ и Ж 40 кг/100 кг шлама концентрация карбида железа максимальна и составляет 56,4 %. Для концентрата марки Ж Межэгейского месторождения максимальное содержание карбида кремния составляет 61 % при его расходе 30 кг/100 кг шлама. При дальнейшем увеличении расхода восстановителя содержание карбида железа снижается за счет разбавления конденсированной фазы из-за избытка углерода в системе. Газовая фаза состоит преимущественно из оксида углерода СО. Таким образом, для полного восстановления железа минимальный расход угольных концентратов из углей марок ГЖ и Ж Кузнецкой ЦОФ, а также Ж Межэгейского месторождения аналогичен и составляет 20 кг/100 кг конвертерного шлама. При необходимости получения феррококса с регламентированным содержанием углерода удельные расходы угольных концентратов могут быть определены по соотношениям:

$$M = 21,94 + 1,68C + 0,02C^2;$$

– Ж Межэгейского месторождения

$$M = 21,62 + 1,52C + 0,02C^2.$$

где  $C$  – содержание углерода, %;  $M$  – расход концентрата, кг/100 кг шлама.

На рис. 2 представлены результаты исследования влияния температуры на процесс восстановления. При расходах 20 кг/100 кг шлама были рассчитаны равновесные составы в диапазоне температур 100 – 1600 °С. Температурные зависимости состава конденсированной фазы процесса восстановления конвертерного шлама концентратами углей марок ГЖ и Ж Кузнецкой ЦОФ и угля марки Ж Межэгейского месторождения идентичны. Анализ результатов расчетов показывает, что оксид железа  $Fe_3O_4$  существует

при температурах ниже 600 °С,  $FeO$  – в диапазоне температур 500 – 700 °С. При температу-

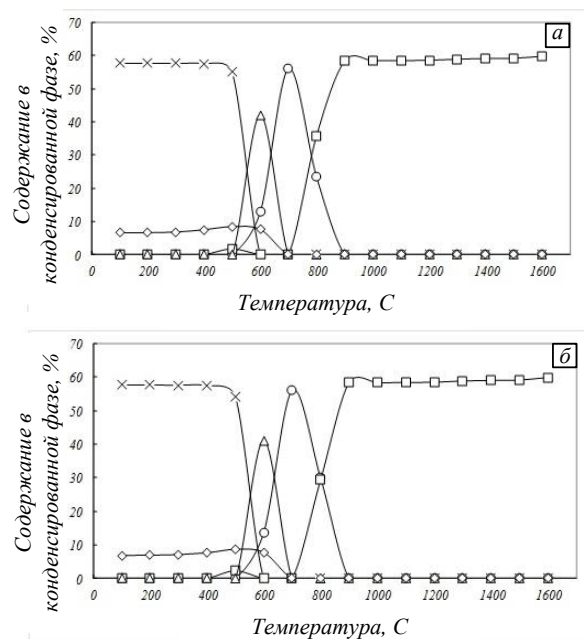


Рис. 2. Температурные зависимости состава конденсированной фазы процесса восстановления конвертерного шлама концентратами углей марок ГЖ и Ж Кузнецкой ЦОФ (а), и угля марки Ж Межэгейского месторождения (б):

◇ – C; □ – Fe; Δ – FeO; ○ – Fe<sub>3</sub>C; × – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

рах 500 – 900 °С восстановленное железо находится в виде карбида, выше 900 °С – в системе присутствует только чистое железо. При низких температурах газовая фаза состоит преимущественно из  $CH_4$ , при температурах выше 900 °С – из СО. Таким образом, для полного восстановления железа необходимы температуры не ниже 900 °С.

**Выводы.** С использованием программного комплекса «Терра» проведено термодинамическое моделирование восстановления железа при производстве феррококса с применением адсорбционного обезвоживания и термохимического окускования конвертерных шламов. Установлено, что при использовании в качестве восстановителей концентратов ЦОФ «Кузнецкая» (состоящего из 50 % газового жирного (ГЖ) и 50 % жирного (Ж) углей) и угля марки Ж Межэгейского месторождения полное восстановление железа происходит при их расходе 20 кг/100 кг шлама. Для получения феррококса с регламентированным содержанием углерода получены расчетные соотношения. Установлено, что для полного восстановления железа термохимическое окускование шлама в смеси со спекающимися углями необходимо проводить при температурах не ниже 900 °С.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Дорوفеев Г.А. Перспективы применения синтетических композиционных материалов в электродуговых печах // *Сталь*. 2015. № 10. С. 13 – 16.
2. Шахпазов Е.Х., Дорوفеев Г.А. Новые синтетические композиционные материалы и технология выплавки стали с их использованием. – М.: Интерконтакт Наука, 2008. – 272 с.
3. Ульянов В.П., Булавин В.И., Бутенко А.Н. Термическая переработка нефть- и железосодержащих промышленных отходов с получением товарной продукции // *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2004. № 3. С. 48 – 53.
4. А.с. 1151768 СССР. Способ утилизации маслокалиносодержащих отходов / В.П. Ульянов, А.Г. Злобин, Г.С. Умнов и др. // *Открытия. Изобретения*. 1985. № 15. С. 115.
5. Тайц Е.М. Кокс и железокс на основе брикетирования. – М.: Металлургия, 1965. – 173 с.
6. Школлер М.Б., Протопопов Е.В., Кузнецов С.Н., Темлянец М.В., Иванов В.П. Разработка основ технологии адсорбционного обезвоживания и термохимического окискования конвертерных шламов // *Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии*. 2016. Вып. 37. С. 46 – 53.
7. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. – В кн.: III между. симпозиум «Горение и плазмохимия». 24 – 26 августа 2005. Алматы, Казахстан. – Алматы: Казак. университеті, 2005. С. 52 – 57.

© 2017 г. С.Н. Кузнецов, И.А. Рыбенко,  
Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец,  
С.В. Фейлер

Поступила 01 февраля 2017 г.

## ГОРНОЕ ДЕЛО И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

УДК 551.3.051.5

Я.М. Гутак<sup>1</sup>, Д.А. Рубан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет

<sup>2</sup>Южный федеральный университет

### НЕСОГЛАСИЯ И ПЕРЕРЫВЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОССИЙСКИМИ СПЕЦИАЛИСТАМИ

Термины «несогласие» и «перерыв» являются фундаментальными в геологии, характеризуют нарушения континуума в осадочных последовательностях. В отечественной литературе эти термины достаточно однозначны и в целом их использование не вызывает каких-либо трудностей. Согласно классическим определениям в "Геологическом словаре" [1] несогласное залегание слоев осадочных пород проявляется в последовательности, где более древние отложения отделены от более молодых поверхностью, соответствующей перерыву, который, в свою очередь, явился следствием прекращения седиментации с размывом ранее накопленных слоев или без такового. Выделяются различные типы несогласий, среди которых наиболее примечательно угловое, являющееся следствием тектонических деформаций во время перерыва. Сходная трактовка характерна для многих работ Советского периода (например, см. [2]), доминирует она и в настоящее время.

Международная терминология, касающаяся нарушений континуума осадочных последовательностей, гораздо более разнообразна. В частности, используются следующие термины: *unconformity* (в том числе *angular unconformity*), *disconformity*, *discontinuity*, *diastem*, *hiatus*, *sedimentary (sedimentation) break*, *stratigraphic gap* и *non-deposition*. Первые три видятся сопоставимыми с термином *несогласие*, а следующие пять – с термином *перерыв*. Однако такая синонимичность является только кажущейся, так как эти термины имеют свои коннотационные особенности, проявляющиеся в том числе и в том, как ими пользуются зарубежные специалисты. Привлечь внимание российских ученых к подобного рода вопросам необходимо по причине того, что отечественная геологическая наука все быстрее интегрируется в мировую. При обращении к англоязычным работам специалист может оказаться дезориентирован отмеченной выше множественной

терминологией и испытает еще большие трудности при подготовке статей в крупные международные журналы. Наконец, вполне возможна ситуация, что при использовании таких инновационных инструментов, как секвентная стратиграфия возникнет путаница и в русскоязычной терминологии вследствие «калькирования» или некорректного применения англоязычных терминов.

Целью настоящей работы является анализ отмеченных выше терминов, касающихся несогласий и перерывов, в контексте их использования в современных работах зарубежных ученых.

Прежде всего попробуем разобраться в особенностях терминов, исходя из их классического понимания [3, 4]. *Unconformity* – это любое хорошо выраженное несогласие, которое может быть, в частности, параллельным (*disconformity*) и угловым (*angular unconformity*). Эти термины обозначают соотношение более древних и более молодых слоев. *Hiatus* – это перерыв, что следует понимать и как поверхность в изучаемом разрезе, и как соответствующий временной интервал. *Diastem* – очень короткий перерыв. *Discontinuity* – это любое нарушение непрерывности, в том числе фиксируемое геофизическими методами. При этом стоит отметить, что даже в классическом варианте терминология не была в должной степени упорядоченной [3, 4]. Так, понятие *disconformities* иногда включали из более широкого по определению понятия *unconformity* (в таком случае термин *angular unconformity* по сути превращается в плеоназм [5]). Более того, эти понятия использовались по отношению к несогласиям, маркирующим крупные региональные перерывы, коррелируемые с осадочными толщами на других территориях.

Теперь стоит обратиться к «свежей» работе крупнейшего канадского стратиграфа Э. Майалла [6], в которой сделана попытка система-

тизировать современные представления о несогласиях. Попытка эта оказалась удачной в том смысле, что она позволила классифицировать несогласия иерархически (подобно тому, как это ранее сделали для геологических катастроф авторы настоящей работы [7]) и обозначить основные генетические модели для каждого уровня. Однако в работе [6] также выявлены проблемы с терминологией. Стоит обратить особое внимание на два обстоятельства. Во-первых, Э. Майалл активно использует термин *sedimentary break* для того, чтобы охарактеризовать весь спектр несогласий и перерывов. Во-вторых, этот специалист отмечает наличие таких несогласий/перерывов, которые в силу своей незначительности не будут признаны специалистами ни как *unconformity/hiatus*, ни как *diastem*. И первое, и второе указывает на некоторую ограниченность применения термина *unconformity*.

С помощью on-line библиографической базы "Scopus" (scopus.com; доступ предоставлен Зональной научной библиотекой Южного федерального университета) можно проследить, как различные авторы используют англоязычные термины, относящиеся к несогласиям и перерывам, в своих работах. Результаты оказываются следующими. *Unconformity* – термин используется широко для обозначения несогласий, как правило, достаточно крупных (как угловых, так и параллельных). *Disconformity* – термин используется реже и при этом различно: некоторые специалисты специально обозначают им параллельные несогласия, тогда как другие применяют его почти как синоним *unconformity*. *Diastem* – термин используется сравнительно редко для обозначения несогласий, соответствующих небольшим перерывам, или самих этих перерывов. *Discontinuity* – термин используется широко и при этом весьма произвольно. Часто он применяется в отношении незначительных несогласий (в частности, Э. Майаллом [6]), в том числе при их множественности в осадочной последовательности. Однако столь же популярно использование этого термина в случаях сложных по геометрии/генезису несогласий. Кроме того, этот термин традиционно используется при интерпретации результатов геофизических исследований. Содержательно он шире, чем в достаточной мере синонимичный ему термин *unconformity*, однако *discontinuity* явно используется в том случае, когда автору нужно подчеркнуть некоторую неопределенность, которая не позволяет говорить о *unconformity*. *Hiatus* – термин используется широко для обозначения как поверхностей, так и времени пе-

рерывов. При этом важно помнить, что во время перерыва осадконакопление могло иметь место, однако сформировавшиеся таким образом слои были впоследствии размыты. *Sedimentary (sedimentation) break* – термин используется сравнительно редко для обозначения перерывов в осадконакоплении. При этом слово "break" явно заставляет задуматься о своего рода катастрофичности, объясняющей нарушение континуума осадочной последовательности. Любопытно отметить, что Э. Майалл [6] скорее использует этот термин для обозначения поверхности перерывов, то есть как синоним *unconformity*. *Stratigraphic gap* – термин используется умеренно часто для обозначения выпадения из стратиграфических последовательностей отдельных интервалов. *Non-deposition* – термин используется реже для обозначения времени, в течение которого осадконакопления не происходило; подчас характеризует ситуацию, когда осадки локально не накапливались в силу действия специфических факторов непосредственно в бассейне седиментации.

Все сказанное свидетельствует о неоднозначности англоязычной терминологии, используемой современными геологами. Так, *unconformity* хотя по сути и синонимичен русскоязычному термину *несогласие*, но явно отличается от него коннотационными признаками. Также различие между терминами *несогласие* и *перерыв* видится гораздо более четким, чем между *unconformity* и *hiatus*. Работа Э. Майалла [6] скорее закрепляет такую неоднозначность, чем устраняет ее. При этом сказанное выше вовсе не свидетельствует о том, что множественность терминологии способствует конкретизации характеристик геологических объектов. В этой связи отечественным специалистам следует весьма осторожно подходить к восприятию соответствующей информации. Как минимум следует учитывать коннотационные особенности, отмеченные выше или следующие непосредственно из текста конкретной работы. Непосредственный перенос англоязычной терминологии в отечественную практику представляется вовсе нецелесообразным. Что касается подготовки статей на английском языке для международных журналов, то стоит использовать подходящие термины интуитивно. Безусловно, можно отдать предпочтение понятиям *unconformity* и *hiatus*, понимая их как *несогласие* и *перерыв* соответственно, однако это, в свою очередь, в некоторых ситуациях способно привести к некорректному восприятию информации зарубежными специалистами.



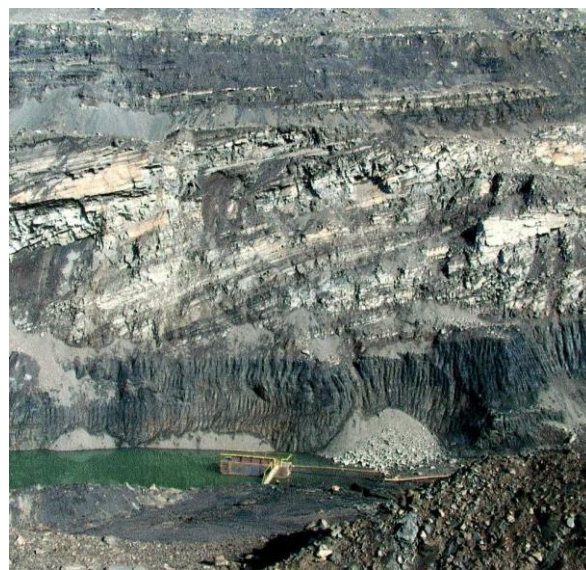
В качестве примера рассмотрим угловое несогласие между отложениями, относимыми к норийскому ярусу верхнетриасового отдела и келловейскому ярусу среднеюрского отдела, которое отчетливо прослеживается в Хаджожском каньоне р. Белая на Северо-Западном Кавказе (Республика Адыгея) [8]. Норийские слои залегают наклонно, падая с большим углом. Залегание келловейских обломочных пород, напротив, почти горизонтальное (в действительности моноклинальное с небольшим углом наклона). В основании келловейской толщи залегают базальные конгломераты. Соответствующий несогласию перерыв охватывает более 40 млн. лет. Однако на самом деле отложения в это время накапливались и были размыты при тектонической перестройке территории непосредственно перед началом келловейского века. На соседних участках несогласие также фиксируется, однако соответствующий перерыв был значительно более коротким, охватывая непродолжительный интервал в пределах средней юры. По отношению к указанному несогласию вполне может быть использован общий термин *unconformity*, так как это типичное угловое несогласие. Что касается перерыва, то уместным видится использование как термина *hiatus*, так и термина *stratigraphic gap*. Последний кажется даже более подходящим, так как имеет место лишь локальное выпадение значительного стратиграфического интервала, тогда как фактический перерыв осадконакопления был в разы меньшим, и именно он может быть обозначен как *hiatus*.

Многочисленные несогласия установлены в верхнемиоценовых отложениях Ростовского свода и прослеживаются в серии обнажений в правом борту долины р. Дон и вдоль северного побережья Таганрогского залива Азовского моря (Ростовская область) [9, 10]. Они часто локальны, а соответствующие им перерывы были непродолжительными. В ряде случаев это параллельные несогласия в литологически сходных толщах, однако такое их восприятие усложняется сложной архитектурой этих толщ, которая подчас отражает особенности палеорельефа (в том числе древние речные долины). По отношению к данным несогласиям логично применять термин *discontinuity*, а в случае широкого пространственного распространения и более длительного перерыва – *disconformity*. Так как формирование толщи было связано с периодическим нарушением седиментации в Танаисском палеозаливе, то логично для соответствующих перерывов

предпочесть термин *sedimentation break*, хотя термин *hiatus* также можно использовать.

В качестве примера небольшого перерыва (*diastem*) приведем разрез угленосной молассы Кузнецкого каменноугольного бассейна (Кемеровская область). Здесь в общем разрезе угленосной толщи присутствуют мощные (до 70 м и более) пачки косослоистых грубообломочных (конгломерат, гравелит, песчаник) пород. Их образование связывается с прохождением паводков (селей). Мощность таких отложений увеличивается при приближении к восточному краю бассейна и уменьшается при движении на запад. При этом наблюдается постепенное выполаживание косых слоев и уменьшение их мощности. В конечном виде след паводка представлен слоем алевrolита, аргиллита согласно залегающим на подстилающих отложениях. В месте выхода паводка на прибрежную аккумулятивную равнину наблюдаются отчетливые угловые несогласия и размывы подстилающих отложений. Наиболее ярко это выражено в районе Талдинского углеразреза в левобережье р. Томь ниже Новокузнецка (см. рисунок). Продолжительность такого перерыва определяется временем прохождения паводка (несколько суток, первые месяцы), а его выраженность – только площадью конуса выноса. При такой характеристике события поверхность несогласия выражена очень четко и может быть использована при стратиграфических внутрибассейновых корреляциях.

В целом международная терминология, касающаяся несогласий и перерывов, нуждается в значительном уточнении по примеру того,



Несогласное налегание пачки косослоистых пород на пласт каменного угля (внизу). Талдинский углеразрез, тайлуганская свита (верхняя пермь)

как это недавно было сделано для дизъюнктивных нарушений [11]. В качестве возможного пути предложим ранжировать перерывы по их пространственному развитию (глобальные, региональные и местные). Глобальные перерывы проявлены на значительной части планеты (например, преддевонский перерыв), региональные – в пределах крупных тектонических блоков (например, Восточно-Европейская платформа), местные – в пределах отдельных геоструктур (например, синеклиза, прогиб). С учетом наличия в российской геологической науке хорошо укоренившихся традиций обобщения, систематизации информации и разработки классификационных схем на прочной концептуальной основе для деятельности отечественных специалистов открыты широкие перспективы. Следование отмеченным традициям вполне может послужить нормализации международной терминологии при одновременном усилении позиций российских ученых в мировом научном сообществе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геологический словарь. В 2 Т. – М.: Недра, 1978. Т. 1. – 486 с.; Т. 2. – 456 с.
2. Справочник по тектонической терминологии. – М.: Недра, 1970. – 584 с.
3. Деннис Дж. Международный словарь английских тектонических терминов. – М.: Мир, 1971. – 288 с.
4. Толковый словарь английских геологических терминов. Т. 1 – 3. – М.: Мир, 1977 – 1979. Т. 1. – 589 с.; Т. 2. – 589 с.; Т. 3. – 544 с.
5. Розенталь Д.Э., Теленнова М.А. Словарь-справочник лингвистических терминов. – М.: Просвещение, 1985. – 399 с.
6. Miall A.D. The valuation of unconformities // *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 163. P. 22 – 71.
7. Gutak J.M., Ruban D.A. Catastrophes versus events in the geologic past: how does the scale matter? // *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*. 2013. Vol. 37. P. 163 – 180.
8. Ruban D.A. Major Paleozoic-Mesozoic unconformities in the Greater Caucasus and their tectonic re-interpretation // *GeoActa*. 2007. Vol. 6. P. 91 – 102.
9. Ruban D.A. The Upper Miocene of the Rostov Dome (Eastern Paratethys): Implication of the chronostratigraphy and bivalvia-based biostratigraphy // *Geoloski anali Balkanskoga poluostrva*. 2005. Vol. 66. P. 9 – 15.
10. Ruban D.A. Stratigraphic evidence of a Late Maetian (Late Miocene) punctuated transgression in the Tanais Palaeobay (northern part of the Eastern Paratethys, South-West Russia) // *Geologos*. 2010. Vol. 16. P. 169 – 181.
11. Peacock D.C.P., Nixon C.W., Rotevatn A., Sanderson D.J., Zuluaga L.F. Glossary of fault and other fracture networks // *Journal of Structural Geology*. 2016. Vol. 92. P. 12 – 29.

© 2017 г. Я.М. Гутак, Д.А. Рубан  
Поступила 17 января 2017 г.

УДК 622.817.49:519.62:512.644

*И.А. Поздеев*

ОАО «Распадская угольная компания» ООО «Шахта «Есаульская»

#### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА МЕТАНООБИЛЬНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ С УЧЕТОМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ

Повышение нагрузки на очистной забой и увеличение глубины ведения горных работ способствовали росту метановыделения в горные выработки выемочного участка и шахты в целом, что явилось причиной частых простоев

очистных забоев вследствие загазирования выработок с исходящей струей воздуха.

Расчет параметров вентиляции выемочных участков на шахтах выполняется согласно действующим нормативным документам, однако фактическая метанообильность очистного за-

боя, как правило, отличается от метанообильности, полученной при расчете. В результате этого воздуха, подаваемого на выемочный участок, недостаточно для ритмичной и безаварийной работы комплексно-механизированного забоя. Этот факт свидетельствует о том, что задача управления метановыделением при отработке газоносных угольных пластов до сих пор не решена.

По результатам анализа действующих нормативных документов [1, 2] выявлено, что при расчете метанообильности выемочных участков не в полной мере учитываются изменения физико-механических свойств углепородного массива во время ведения очистных работ. В частности, принята идеализированная модель геомассива с постоянными фильтрационными свойствами угля и пород. Для прогноза метанообильности используется лишь один фактор – степень метаморфизма углей.

Однако на практике из графиков, полученных на основе данных концентраций метана, фиксируемых аппаратурой системы АГК, установленной в выработках с исходящей из очистного забоя струей воздуха, следует, что метановыделение с отрабатываемого пласта в процессе выемки угля происходит неравномерно. В этой связи обоснована актуальная научно-практическая задача, которая заключается в разработке алгоритма расчета метанообильности очистного забоя с учетом изменения фильтрационных свойств угля отрабатываемого пласта под действием геомеханических процессов.

Решение обозначенной задачи осуществлялось в два этапа:

1 – численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) углепородного массива в окрестности очистного забоя;

2 – создание алгоритма расчета ожидаемой метанообильности очистного забоя, в котором учитывается изменение фильтрационных свойств массива.

Моделирование НДС геомассива в окрестности очистного забоя осуществлялось с использованием пакета компьютерных программ, разработанных на кафедре геотехнологии в Сибирском государственном индустриальном университете. Комплекс программ адаптирован для решения двумерных задач геомеханики и выявления закономерностей изменения механических, реологических и плотностных свойств углепородного массива [3 – 9].

В качестве объекта исследования принят углепородный массив Байдаевского месторож-

дения в пределах шахтного поля ООО «Шахта «Есаульская», Кузбасс. Исследования проведены в период отработки выемочного столба 26-28 по пласту 26<sup>а</sup>.

Средняя глубина ведения горных работ составляет 490 м, вынимаемая мощность разрабатываемого пласта 2,1 м, угол падения от 1 до 10°. Горный массив представлен алевролитами и песчаниками, а также включает семь угольных пластов, ближайший из которых пласт 29<sup>а</sup> залегает в 130 – 150 м выше отрабатываемого пласта 26<sup>а</sup>. Шахта отнесена к сверхкатегорной по газу метану. Система разработки столбовая, с полным обрушением пород кровли, подвиганием очистного забоя длиной 300 м по восстанью. Схема выемки угля в лаве – челноковая, снизу вверх по ходу струи свежего воздуха.

При моделировании определялись следующие параметры НДС геомассива: главные, вертикальные и горизонтальные составляющие тензора напряжений и деформаций массива пород; вертикальные и горизонтальные смещения; отношение остаточной прочности пород к исходной. Выбор этих параметров обусловлен возможностью их использования для обоснования технологических решений при проектировании выемочных участков.

Составляющими метанообильности очистного забоя являются интенсивность метановыделения с поверхности забоя и из транспортируемой по забойному скребковому конвейеру горной массы. В этой связи составлено следующее уравнение:

$$I_{\text{оч.з}} = I_{\text{пл}} + I_{\text{т.г.м.}} \quad (1)$$

где  $I_{\text{оч.з}}$  – метанообильность очистного забоя, м<sup>3</sup>/мин;  $I_{\text{пл}}$  – метанообильность отрабатываемого пласта, м<sup>3</sup>/мин;  $I_{\text{т.г.м.}}$  – метанообильность транспортируемой по забойному конвейеру горной массы, м<sup>3</sup>/мин.

Для определения дебита метана, выделившегося с поверхности очистного забоя, возможно применение закона Дарси, который характеризует скорость фильтрации газа в направлении к свободной поверхности отрабатываемого пласта [10]:

$$\vartheta = -\frac{k}{\mu} \frac{dP(x)}{dx} \quad (2)$$

где  $\vartheta$  – скорость фильтрации газа, м/с;  $k$  – коэффициент проницаемости массива;  $\mu$  – динамическая вязкость газа, Па·с;  $P$  – давление газа, МПа;  $x$  – расстояние до поверхности очистного забоя, м.



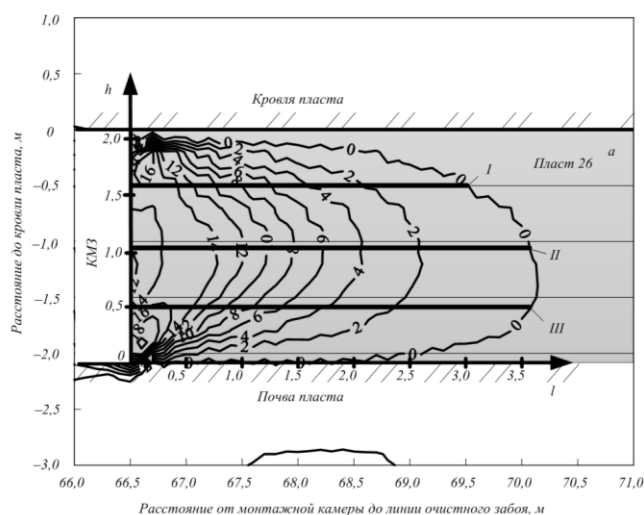


Рис. 1. Вариант результатов моделирования изменения горизонтальных деформаций угольного массива впереди очистного забоя для заданных условий ведения горных работ ( $\epsilon \cdot 10^{-3}$ ):  
 0 – 18 – изолинии горизонтальных деформаций; I, II, III – характерные линии изменения деформаций

В реальных условиях давление газа и проницаемость угольного массива не постоянны и меняются в процессе ведения очистных работ. С целью учета меняющихся физико-механических свойств массива предлагается использовать формулу, предложенную Б.Г. Тарасовым [11]:

$$k = 2,08d^2 \frac{m_0 + du/dx}{1 + du/dx}, \quad (3)$$

где  $d$  – эквивалентный диаметр породообразующего зерна;  $m_0$  – природная пористость массива;  $du/dx$  – деформация массива.

По результатам численного моделирования НДС массива установлено, что величина и зона распространения деформаций угольного массива зависят от изменчивости горно-геологических и технико-технологических условий ведения горных работ. Для расчета проницаемости обрабатываемого пласта предлагается использовать результаты моделирования изменения вертикальных и горизонтальных деформаций.

Принято условие, что в краевой части обрабатываемого пласта, где проявляются растягивающие деформации, повышена проницаемость угольного массива.

Как следует из результатов исследования НДС массива, в обрабатываемом пласте впереди очистного забоя преобладают сжимающие вертикальные и растягивающие горизонтальные деформации. Поэтому за основу расчета проницаемости предлагается использовать растягивающие горизонтальные деформации. Суммарную величину деформаций в краевой части угольного пласта в процессе ведения

очистных работ предлагается определить по формуле

$$\epsilon_{об} = \int_0^l \epsilon(x) dx, \quad (4)$$

где  $\epsilon_{об}$  – суммарные деформации в краевой части угольного пласта;  $\epsilon$  – распределение деформации в краевой части пласта по направлению  $x$ ;  $l$  – зона активной фильтрации газа, м.

Для использования формул (3) и (4) необходимо установить функциональную зависимость между деформациями и зоной активной фильтрации газа. В этой связи предлагается использовать результаты моделирования изменения горизонтальных деформаций массива (рис. 1).

Введем локальную систему координат  $Olh$  с началом координат на пересечении линии очистного забоя и почвы обрабатываемого пласта (рис. 1). Ось абсцисс указывает расстояние до поверхности очистного забоя, ось ординат – расстояние до почвы пласта. Согласно результатам проведенных исследований, деформации угольного массива изменяются не только в горизонтальной плоскости, но и в вертикальной (рис. 1). В этой связи определены функции, описывающие зависимость деформаций от расстояния до очистного забоя в следующих характерных горизонтальных линиях: у кровли пласта (на рис. 1 линия обозначена цифрой I); в центральной части мощности пласта (на рис. 1 линия обозначена цифрой II); у почвы обрабатываемого пласта (на рис. 1 линия обозначена цифрой III). Общий вид зависимостей следующий:

$$\epsilon_k = al^2 + a_1l + a_2; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cp} = bl^2 + b_1l + b_2; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{п} = cl^2 + c_1l + c_2, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_k$ ,  $\varepsilon_{cp}$  и  $\varepsilon_{п}$  – изменение деформаций по характерным линиям у кровли пласта, в центральной части мощности пласта и у почвы пласта соответственно;  $l$  – зона активной фильтрации газа, м;  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  – коэффициенты эмпирических зависимостей по отдельным плоскостям.

Из функций (5) – (7), описывающих изменение деформаций по отдельным плоскостям, получена обобщенная зависимость изменения деформаций в пределах всей зоны активной фильтрации газа в краевой части пласта:

$$\varepsilon_{об} = (yh^2 + y_1h + y_1)l^2 + (eh^2 + e_2h + e_2)l + (gh^2 + g_2h + g_2), \quad (8)$$

где  $y_i$ ,  $e_i$ ,  $g_i$  – коэффициенты эмпирической зависимости.

С учетом полученных зависимостей функция (4) примет следующий вид:

$$\varepsilon_{об} = \int_0^l \int_0^h (yh^2 + y_1h + y_1)l^2 + (eh^2 + e_2h + e_2)l + (gh^2 + g_2h + g_2)dl dh. \quad (9)$$

Для определения градиента газового давления, используемого в формуле (2), предлагается применить зависимость, предложенную В.А. Колмаковым [10]:

$$P_x = P_0 + (P_1 - P_0) \cdot e^{-\frac{x^2}{2l^2(t)}} , \quad (10)$$

где  $P_x$  и  $P_0$  – соответственно давление газа на любом расстоянии от обнаженной поверхности пласта и начальное давление в пласте, МПа;  $P_1$  – давление газа на обнаженной поверхности пласта, МПа;  $x$  – расстояние до поверхности пласта;  $l(t)$  – глубина зоны разгрузки пласта.

Начальное давление газа в пласте определяется при помощи формулы Г.Д. Лидина [12]

$$P_0 = 0,01(H_T - H_0)^{1,3} + 2, \quad (11)$$

в которой  $P_0$  – давление газа в пласте на расчетной глубине, МПа;  $H_T$  и  $H_0$  – соответственно глубина разработки и зоны газового выветривания, м.

Условимся считать, что давление газа на поверхности очистного забоя в течение процесса фильтрации метана с краевой части обрабатываемого пласта равно атмосферному давлению:

$$P_1 = P_{атм}. \quad (12)$$

Для того, чтобы определить среднее значение градиента газового давления в зоне повышенной фильтрации пласта предлагается следующая формула:

$$P_{cp} = \frac{\int_0^l P'_x dx}{l}, \quad (13)$$

где  $P_{cp}$  – среднее значение градиента газового давления, МПа/м;  $P'_x$  – первая производная от газового давления, МПа;  $l$  – зона активной фильтрации пласта, м.

Интенсивность метановыделения с поверхности очистного забоя зависит от времени его обнажения. Через определенный промежуток времени, после выемки полосы угля, глубина зоны активной фильтрации пласта увеличивается, а давление газа в краевой части обрабатываемого пласта снижается, что приводит к уменьшению дебита выделяющегося метана. Таким образом, формула (10) справедлива для давления газа на вновь обнаженном участке очистного забоя, который соответствует длине полосы угля, вынимаемой очистным комбайном за одну минуту. С целью учета изменения градиента газового давления с течением времени формулу (10) предлагается модернизировать следующим образом:

$$P_x = P_0 + (P_1 - P_0) \cdot e^{-\frac{x^2}{2(l^2(t)\varphi(t))^2}}, \quad (14)$$

где  $\varphi_t$  – функция ползучести угля.

Изменение реологических свойств угольного массива с течением времени предлагается определить при помощи формулы Ж.С. Ержанова [13]:

$$\varphi_t = 1 + \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}, \quad (15)$$

где  $\delta$  и  $\alpha$  – параметры ползучести, характеризующие реологические свойства угля;  $t$  – время цикла выемки угля, с.

Параметр  $\delta$  рассчитывается так:

$$\delta = 4,73 \cdot 10^{-3} - 6,9 \cdot 10^{-9} \cdot E_0; \quad (16)$$

здесь  $E_0$  – модуль упругости угля, т/м<sup>2</sup> [14], определяемый как

$$E_0 = 200 \sigma_{сж}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности угля при сжатии, т/м<sup>2</sup>.

В результате расчета проницаемости угольного массива и давления газа в нем для конкретных горно-геологических и технико-технологических условий и подстановки полученных данных в закон Дарси (2) получен удельный дебит метана, выделяющегося с поверхности обрабатываемого пласта в пространство очистного забоя:

$$q = \frac{k_{(\varepsilon)}}{\mu} P_{ср}, \quad (18)$$

где  $q$  – удельный поток метана в угольном пласте в направлении к свободной поверхности забоя, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин);  $k_{(\varepsilon)}$  – коэффициент проницаемости с учетом изменения деформаций угольного массива;  $\mu$  – динамическая вязкость газа, Па·с.

Модернизация формулы (2) состоит в следующем:

– для определения коэффициента проницаемости массива применяется формула Б.Г. Тарасова (3), при вычислении по которой используются результаты численного моделирования и функции изменения деформаций угольного массива впереди очистного забоя (5) – (7), применение которых позволяет учитывать изменение фильтрационных свойств массива под влиянием геомеханических процессов;

– при вычислении градиента газового давления за основу принята формула В.А. Колмакова (10), в которой учитывается изменение давления в зависимости от расстояния до поверхности очистного забоя, однако она была модернизирована (14) за счет того, что глубина зоны активной фильтрации газа принимается по результатам проведенного моделирования, а учет влияния фактора времени на градиент газового давления осуществляется по функции ползучести Ж.С. Ержанова (15), что позволило частично автоматизировать вычисление градиента давления и снизить трудоемкость расчета;

– синтез уравнений Дарси, Б.Г. Тарасова, В.А. Колмакова, Ж.С. Ержанова и результатов численного моделирования обеспечит вычисление дебита метана, выделившегося с поверхности очистного забоя, с использованием вместо постоянных параметров, которые не в полной мере соответствуют реальным горно-технологическим условиям, переменных значений деформаций и пористости массива. Предложенный подход позволит учитывать

изменение фильтрационных свойств угля в процессе ведения очистных работ.

На основе модернизированных уравнений Дарси, Б.Г. Тарасова, В.А. Колмакова общее количество метана, выделившегося с поверхности обрабатываемого пласта в исходящую струю, предлагается определять по формуле

$$Q_{пл} = Q_{в.об} + Q_{т.об}, \quad (19)$$

где  $Q_{пл}$  – количество метана, выделившегося в исходящую струю с поверхности обрабатываемого пласта, м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{в.об}$  – количество метана, выделившегося в исходящую струю с вновь обнаженной поверхности обрабатываемого пласта, м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{т.об}$  – количество метана, выделяющегося с ранее обнаженной поверхности очистного забоя, м<sup>3</sup>/мин.

Количество метана, выделившегося в исходящую струю с вновь обнаженной поверхности обрабатываемого пласта, составит

$$Q_{в.об} = q_{в.об} L_{в.об} m, \quad (20)$$

где  $q_{в.об}$  – удельный дебит метана, выделившегося с вновь обнаженной поверхности очистного забоя м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин);  $L_{в.об}$  – длина вновь обнаженного участка очистного забоя, м;  $m$  – мощность обрабатываемого пласта, м.

Количество метана, выделившегося в исходящую струю с ранее обнаженной поверхности очистного забоя, составит

$$Q_{т.об} = q_{т.об} L_{т.об} m, \quad (21)$$

где  $q_{т.об}$  – удельный дебит метана, выделившегося с поверхности очистного забоя до начала нового цикла выемки угля, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин);  $L_{т.об}$  – длина очистного забоя за вычетом вновь обнаженного участка, м.

С целью учета метановыделения из транспортируемого по забойному скребковому конвейеру угля предлагается использовать поправочный коэффициент  $K_{т.у}$ , который определяется следующим образом [1]:

$$K_{т.у} = a_2 \sqrt[4]{\frac{l_{оч}}{609_{т.оч}} + \frac{l_{птк}}{609_{т.птк}} + \frac{l_{кш}}{609_{т.кш}}}; \quad (22)$$

здесь  $K_{т.у}$  – коэффициент, учитывающий степень дегазации отбитого угля при его транспортировании по выработкам участка;  $a_2$  – коэффициент, характеризующий газоотдачу отбитого угля;  $l_{оч}$  – длина забойного скребкового конвейера, м;  $\mathcal{G}_{т.оч}$  – скорость транспортирования угля по очистному забою, м/с;  $l_{птк}$  – длина подлавного перегружателя, м;  $\mathcal{G}_{птк}$  – скорость транспортирования угля по подлавному пере-

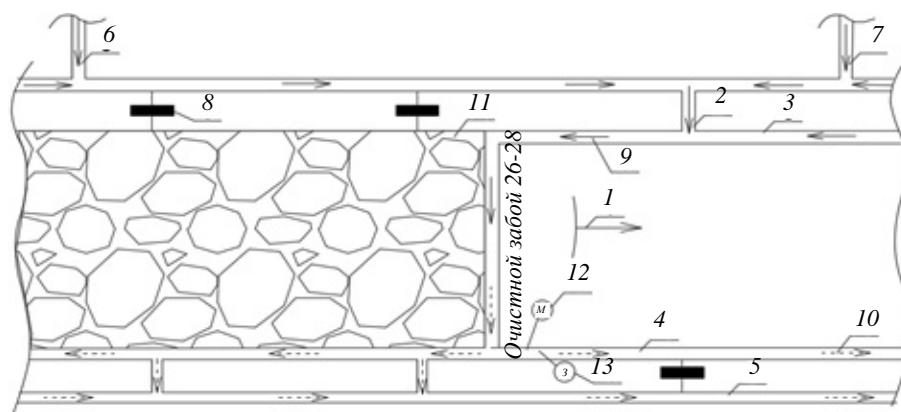


Рис. 2. Схема вентиляции выемочного участка 26-28 ООО «Шахта «Есаульская», Кузбасс:

- 1 – направление движения очистного забоя; 2 – опережающая сбойка; 3 – ходок 26-53; 4 – вентиляционный штрек 26-28; 5 – газодренажный ходок 26-53; 6 – вентиляционный штрек 26-31; 7 – магистральный путевой штрек 26-5; 8 – изолирующая перемычка; 9 – свежая струя воздуха; 10 – исходящая струя воздуха; 11 – выработанное пространство; 12 – датчик метана системы АГК, с которого считывались показания газа метана при проведении эксперимента; 13 – место замера скорости воздуха

грузателю, м/с;  $l_{к.ш}$  – длина конвейера, расположенного в конвейерном штреке, м;  $Q_{к.ш}$  – скорость транспортирования угля по конвейерному штреку, м/с.

Коэффициент, характеризующий газоотдачу отбитого угля  $a_2$ , равен

$$a_2 = 0,25 a_3, \quad (23)$$

где  $a_3$  – коэффициент, характеризующий газоотдачу угля в массиве.

Таким образом, формула (1) примет следующий вид:

$$I_{оч.заб} = I_{пл} (1 + K_{т.у}), \quad (24)$$

где  $I_{оч.заб}$  – метанообильность очистного забоя, м<sup>3</sup>/мин;  $I_{пл}$  – метанообильность отрабатываемого пласта м<sup>3</sup>/мин.

С целью оценки адекватности предложенного алгоритма расчета ожидаемой метанообильности очистного забоя проведен шахтный эксперимент. Для исследования аэрогазовой обстановки за основу принят инструментальный метод. В ремонтные и добычные смены в вентиляционном штреке 26-28, в 20 м выше сопряжения с очистным забоем, при помощи переносного анемометра АПР-2, предназначенного для измерения средней скорости движения воздушных потоков в шахтах, были проведены замеры скорости воздуха (рис. 2). Кроме того, использовались показания скорости воздуха, полученные горными мастерами участка вентиляции и техники безопасности (ВТБ). Учет концентрации метана в исходящей струе очистного забоя осуществлялся при помощи стационарного датчика метана (ДМС01),

предназначенного для непрерывного контроля концентрации метана на угольных предприятиях.

Таким образом, за период проведения эксперимента сделано более 100 замеров скорости воздуха и проведен газовый анализ 90 забоев.

Согласно «Инструкции по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности...» [15] средний расход газа метана, проходившего в пункте измерения в исходящей струе очистного забоя за определенный период времени, определяется по формуле

$$I_M = 0,01 \frac{\sum Q_{уч}}{n_B} \cdot \frac{\sum C_M}{n_M}, \quad (25)$$

где  $I_M$  – средний расход газа метана, проходившего в пункте измерения, м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{уч}$  – расход рудничного воздуха в исходящей струе выемочного участка, м<sup>3</sup>/мин;  $C_M$  – концентрация метана в исходящей струе выемочного участка по данным системы аэрогазового контроля (АГК), %;  $n_B$  – количество измерений расхода рудничного воздуха;  $n_M$  – количество учитываемых значений метана за исследуемый период по данным системы АГК.

С целью выявления зависимости газообильности очистного забоя от скорости движения выемочного комбайна определялись среднестатистические значения концентрации газа метана и скорость движения очистного комбайна за рабочую смену. На основе полученных данных по формуле (25) вычислена фактическая абсолютная метанообильность очистного забоя в зависимости от скорости движения комбайна, а также по разработанно-

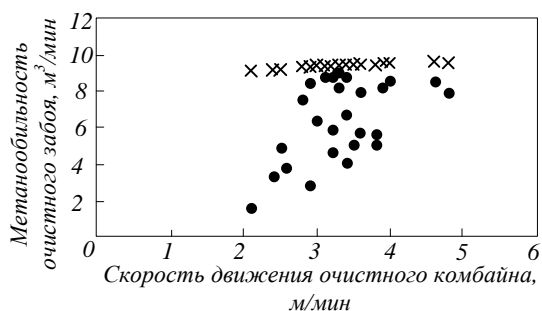


Рис. 3. Зависимости фактической (●) и расчетной (×) абсолютной метанообильности очистного забоя от скорости движения очистного комбайна

му алгоритму рассчитана ожидаемая абсолютная метанообильность для тех же скоростей.

На рис. 3 изображены результаты расчета фактической и расчетной абсолютной метанообильности очистного забоя 26-28, откуда следует, что разработанный алгоритм обеспечивает прогноз максимально возможной метанообильности очистного забоя.

**Выводы.** На основе полученных ожидаемых значений метанообильности очистного забоя становится возможным вычисление параметров проветривания выемочного участка, соблюдение которых исключит возникновение загазований выработок и обеспечит устойчивую и безопасную работу комплексно-механизированного забоя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Утверждена приказом № 680 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 01.12.2011.
- Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – Макеевка-Донбасс, 1989.
- Риб С.В., Фрянов В.Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для численного моделирования напряженно-деформированного состояния неоднородных угольных целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 3. С. 367 – 371.
- Риб С.В., Волошин В.А., Максимов А.А., Борзых Д.М., Никитина А.М., Фрянов В.Н. Численное моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния углеродного массива при переходе очистным забоем передовой выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 3. С. 414 – 422.
- Петрова О.А., Васильев П.В., Фрянова О.В., Фрянов В.Н. Модель формирования напряжений, деформаций и повреждений в углеродном массиве при интеграции гравитационного и геотектонического полей напряжений. Материалы за VIII международна научна практична конференция «Новината за напреднади наука – 2012». Т. 26. Технологии. – Бял ГРАД-БГ ООД. София: 2012. С. 10 – 19.
- Фрянов В.Н., Петрова О.А., Петрова Т.В. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве: свидетельство о регистрации электронного ресурса. № 21123, дата регистрации 03 августа 2015 года // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» № 08–09 (75–76) август-сентябрь 2015. С. 2. Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper05.php>.
- Fryanov V.N., Pavlova L.D. Prospects for application of robotic mechano-hydraulic excavation of gas-bearing coal layers at great depths // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 45. (012002). Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/45/1>.
- Tsvetkov A.B., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Construction of the approximant of complete diagram for rock deformation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 45. (012009). Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/45/1>.
- Pristupa Yu.D., Fryanov V.N., Pavlova L.D. Construction of a conceptual model of transport system for a coal mining region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 45. (012014). Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/45/1>.
- Колмаков В.А. Метановыделение и борьба с ним в шахтах. – М.: Недра, 1981. – 134 с.
- Тарасов Б.Г., Колмаков В.А. Газовый барьер угольных шахт. – М.: Недра, 1978. – 200 с.
- Лидин Г.Д. К вопросу о закономерности выделения метана из угля, отторгнутого из массива. – В кн.: Управление газовыделением и пылеподавлением в шахтах. – М.: Наука, 1972. С. 50 – 52.

13. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложение. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 173 с.
14. Методика выбора рациональных параметров технологических схем очистной выемки пологих угольных пластов гидрошахт Кузбасса / В.Н. Фрянов, А.П. Колесников, А.Н. Златицкий и др. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 1988. – 139 с.
15. Инструкция по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану и/или диоксиду углерода. Утверждена приказом № 704 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 06.12.2012.

© 2017 г. И.А. Поздеев  
Поступила 1 февраля 2017 г.

УДК 622.831

*А.А. Исаченко, А.А. Петров*

ООО «Распадская угольная компания»

### **ОБОСНОВАНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ СБОЕК КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК, ПРОЙДЕННЫХ В НЕОДНОРОДНОМ УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ**

При подземной разработке свиты угольных пластов при вскрытии и подготовке шахтных полей возникает необходимость проведения вскрывающих и подготавливающих выработок в неоднородном углепородном массиве. К таким выработкам следует отнести квершлагги, бремсберги, уклоны, сбойки, камеры различного назначения, газодренажные выработки и др. Устойчивость вмещающих пород на различных участках таких выработок существенно зависит от свойств этих вмещающих пород, формы и размеров поперечного сечения линейной части выработки и ее сопряжений с другими выработками.

В существующих нормативных документах рекомендуется выработку по ее длине делить на отдельные участки по горно-геологическим признакам и для каждого участка проводить расчеты параметров крепи, выбирать способы и схемы поддержания.

Однако при проведении наклонных или горизонтальных квершлаггов (сбоек) между выработками соседних угольных пластов свиты весьма сближенных пластов выделить участки с однородными горно-геологическими параметрами горных пород не представляется возможным. Например, при проведении наклонного квершлага с нижнего пласта на верхний необходимо выделять отдельные участки сопряжений квершлага (сбойки) с выработками нижнего и

верхнего пластов, а также участки пересечения выработки с породными слоями разной прочности, и для каждого участка осуществлять выбор параметров крепи с учетом взаимного влияния свойств пород на соседних участках. Естественно, использовать действующие методики в этом случае не представляется возможным.

В этой связи возникает актуальная научно-практическая задача прогноза геомеханических параметров, типа и конструкции крепи с учетом интегрального влияния разных свойств пород на соседних участках выработок, а также формы и размеров сопряжений и пересечений выработок.

В настоящей работе решение поставленной задачи осуществлено при разработке паспортов крепления квершлаггов (сбоек) капитальных выработок в условиях одной из шахт Кузнецкого угольного бассейна. Для обеспечения основного и вспомогательного транспорта, вентиляции и запасных выходов между уклонами пластов 1 и 2 (рис. 1) предложено проведение наклонных сбоек. Обоснование параметров крепи квершлаггов на отдельных этапах их проведения и крепления осуществлено с использованием численного моделирования напряженно-деформированного состояния пород в окрестности сбойки, пройденной от вентиляционного уклона пласта 1 до конвейерного уклона пласта 2.

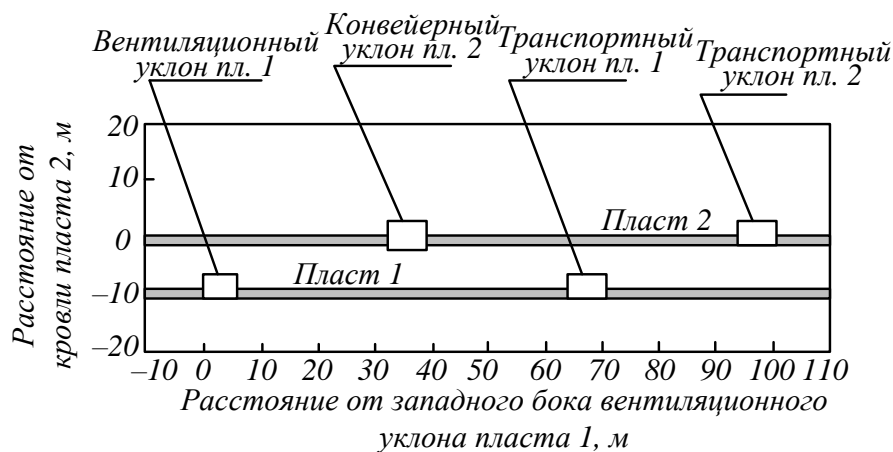


Рис. 1. Схема расположения уклонов

Цель настоящей работы – обосновать рекомендации для обеспечения устойчивости горных выработок при взаимном влиянии элементов сложной системы «весьма сближенные пласты 1 и 2, четыре охраняемые угольными целиками уклона, сбойки между уклонами пластов».

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработана методика исследований и проведена адаптация пакета компьютерных программ к горно-геологическим и горнотехническим условиям весьма сближенных пластов 1 и 2;

- проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния углепородного массива в окрестности сбоек уклонов;

- обоснованы по результатам моделирования параметры крепи сбоек для обеспечения их устойчивости в условиях весьма сближенных угольных пластов с изменчивыми природными условиями.

Объектом исследования являются процессы деформирования горных пород под влиянием взаимодействующих техногенных и природных напряжений в окрестности четырех уклонов на весьма сближенных угольных пластах 1 и 2.

Методы исследований: экспертная оценка, математическое моделирование численными методами механики горных пород, обобщение результатов исследований.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива использованы следующие исходные данные:

- план горных выработок по пласту 2;
- геологические колонки по геологоразведочным скважинам (рис. 2);
- рабочие чертежи пространственного положения следующих уклонов: вентиляционно-

го уклона пласта 1, конвейерного уклона пласта 2, транспортно-го уклона пласта 1, транспортного уклона пласта 2;

- прогнозный геологический разрез по транспортному уклону пласта 1.

Мощность пород между пластами 1 и 2, представленная переслаиванием аргиллитов и алевролитов, по трассе уклонов составляет 7,09 м. В кровле пласта 2 залегает алевролит мелкозернистый сухой без расслоения, а в почве пласта 1 – алевролит мелкозернистый (рис. 2).

Учитывая отсутствие результатов натурных измерений деформаций пород в сбоях уклонов в качестве основного при исследовании принят метод конечных элементов [1 – 3] с использованием авторских пакетов программ KLATRAT, разработанных на кафедре геотехнологии Сибирского государственного индустриального университета [4 – 6]. В качестве исходных приняты данные геологической колонки. Геометрическая модель представлена в виде вертикального разреза, перпендикулярно осям уклонов. Начало условной системы координат принято на пересечении кровли пласта 2 и западного бока вентиляционного уклона пласта 1 (рис. 1). Размеры модели по простиранию приняты с учетом возможного влияния очистного выработанного пространства выемочных столбов пласта 2 на состояние пород в окрестности уклонов. Размеры геометрической модели по простиранию – 480 м. Глубина залегания пласта 2 – 270 м.

Рассмотрено три этапа проведения сбоек прямоугольной и арочной формы поперечного сечения.

*Первый этап* проведения сбоек с присечкой пород кровли пласта 1 (рис. 3). Выявлено начало активного влияния пласта 2 на устойчивость пород кровли сбоек на расстоянии 4,5 м от почвы пласта 2.

Слой	Колонка	Литотип	Порода	Физико-механические свойства				Устойчивость, обрушаемость			Содержание SiO <sub>2</sub> , %
				Мощность	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Коэф. крепн.	Сопротивление сжатию, МПа	Тип кровли	Допуст. площадь обнаж., м <sup>2</sup>	Допустимое время обнажения, мин	
Основная кровля		Ал. м/з., Ал кр/з., АП	Алевролит мелкозернистый, алевролит крупнозернистый, алевропесчаник	10,0 – 26,6	2,60	5 – 9	50 – 90	Ср.О.	–	–	30 – 40 и более 40
Непосредственная среда		Ал. м/з.	Алевролит мелкозернистый	7,0 – 8,4	2,60	3 – 4	30 – 40	Ср.У	5	до 1 часа	30 – 40
«Ложная» кровля		Ал. м/з. У	Алевролит мелкозернистый	0,2 – 1,0	2,60	2,5 – 3,5	25 – 35	Весьма Н.У.	0,5	5	
Пласт 2		У	Уголь	2,06 – 2,41/2,19	1,26	1	10	–	–	–	
«Ложная» почва		Ал. м/з.	Алевролит мелкозернистый	0,2 – 0,5	2,60	2,5 – 3,5	25 – 35	–	–	–	30 – 40
Непосредственная почва		Ал. м/з.	Алевролит мелкозернистый	0,5 – 7,0	2,60	3 – 4	30 – 40	Склонна к пучению	–	–	30 – 40
Пласт 2		У	Уголь	1,70 – 2,23/1,91	1,28	1	10	–	–	–	
Непосредственная почва		Ал. м/з.	Алевролит мелкозернистый	5,0 – 7,8	2,60	3 – 4	30 – 40	–	–	–	30 – 40
Основная почва		Пер. Ал. м/з. с Ал кр/з.	Переслаивание алевролита мелкозернистого с алевролитом крупнозернистым	8,3 – 9,5	2,60	3 – 4	31 – 40	–	–	–	30 – 40

Рис. 2. Литологическая колонка сближенных пластов 2 и 1

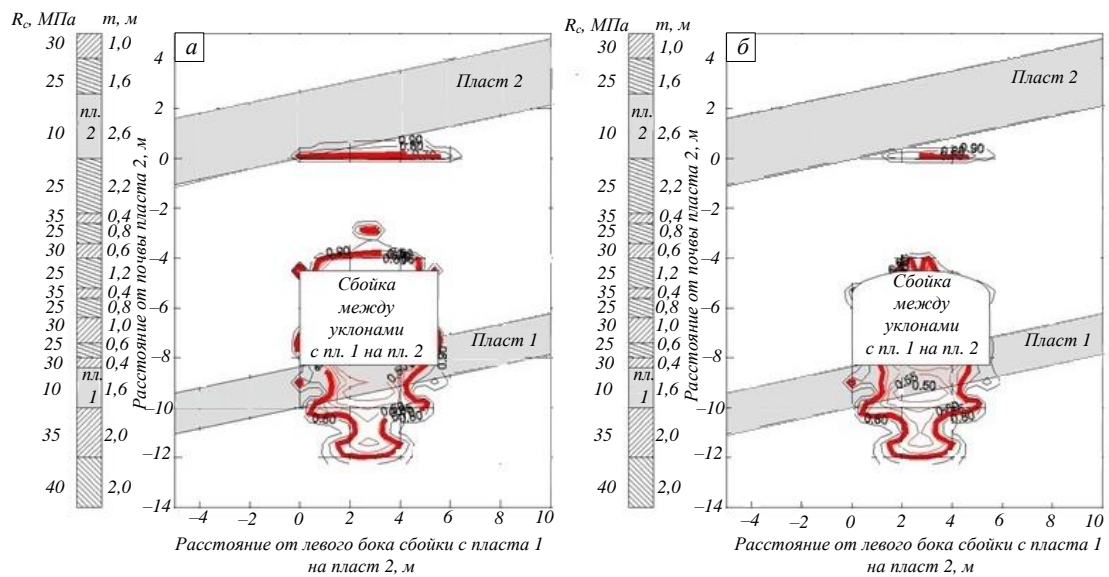


Рис. 3. Зоны разрушения пород при проведении сбойки с присечкой пород кровли пласта 1 (этап 1) при плоской (а) и полуарочной (б) форме кровли выработки

Для геомеханической ситуации (рис. 3) по Инструкции [7] проведен расчет параметров крепи, которая обеспечивает устойчивость выработки на всем протяжении ее эксплуатации. Изменение формы кровли выработки с плоской на полуарку увеличит устойчивость выработки почти в 1,5 раза, что подтверждается объемами зон разрушения пород. Установлено, что на первом этапе проведения сбойки применение как плоской кровли, так и кровли в

форме полуарки не осложнит эксплуатацию выработки. Однако рекомендуется (по сравнению с предлагаемыми в инструкции [7]) увеличить плотность установки анкеров первого уровня. Применение канатных анкеров глубокого заложения не приведет к повышению устойчивости выработки, однако может вызывать нежелательные последствия «набухания» пород кровли при перетоке воды с пласта 2.



*Второй этап* проведения сбойки с расположением сбойки между кровлей пласта 1 и почвой пласта 2 (рис. 4). Расстояние от кровли сбойки до почвы пласта 2 принято в диапазоне 2,5 – 0,6 м. Площади разрушенных пород в окрестности сбойки существенно увеличились за счет разрушения угля и пород кровли пласта 2. Интенсивность запредельного деформирования пород существенно меньше при проведении выработки арочной формы.

Выполненные по Инструкции [7] расчеты параметров крепи позволяют осуществлять крепление выработки вне зависимости от формы сечения. Рекомендуется применять анкеры первого уровня с увеличением плотности уста-

новки в два раза и устанавливать канатные анкеры с закреплением в породах выше пласта 2. Заглубление канатных анкеров в кровлю пласта 2 должно быть 0,5 м, следовательно, длина анкеров второго уровня составит 5,5 м. Для обеспечения устойчивости выработки рекомендуется устанавливать два анкера усиления на один метр выработки. Возможно сокращение количества анкеров первого уровня за счет увеличения количества анкеров усиления.

*Третий этап* проведения сбойки с расположением сбойки у почвы пласта 2 (рис. 5). Расстояние от кровли сбойки до почвы пласта 2 менее 0,5 м и дальнейшее проведение сбойки осуществляется с пересечением угольного пла-

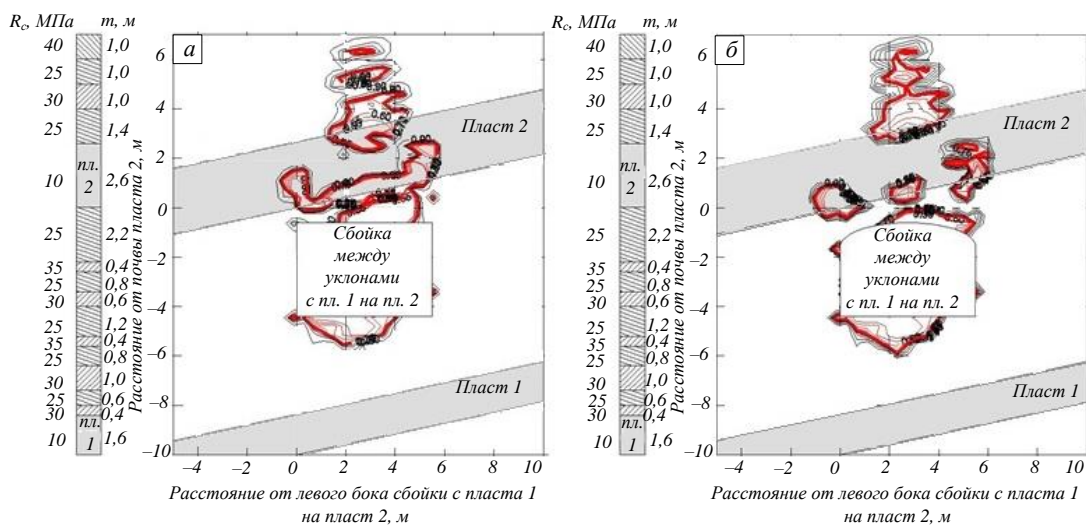


Рис. 4. Зоны разрушения пород при проведении сбойки с расположением ее между кровлей пласта 1 и почвой пласта 2 (этап 2) при плоской (а) и полуарочной (б) форме кровли выработки

ста 2. Это самый сложный этап проведения и поддержания выработки, так как происходит активизация процесса разрушения угля и пород обоих сближенных пластов. Предполагается высокая вероятность куполообразования при нарушении паспорта проведения или изменчивости параметров геомассива. Рекомендованы варианты проведения сбойки с применением проколов или упрочнением угольного массива пласта 2 полимерными материалами.

Обоснованы следующие параметры крепи: анкеры длиной, выходящей за кровлю пласта 2; необходимая величина перебура не менее 0,5 м или применение комбинированной крепи; анкеры первого уровня длиной 2,2 – 2,5 м с шагом установки 0,5 м; усиление пород кровли канатными анкерами с замком закрепления выше кровли пласта 2 на 0,5 – 1,0 м.

На третьем этапе проведения сбойки форма кровли выработки имеет существенное значение. Арочная форма в поперечном сечении обеспечит устойчивость выработки и существенно снизит вероятность инцидента при проведении сбойки в обводненных условиях.

Таким образом, по результатам моделирования геомеханического состояния углепородного массива в окрестности уклонов пластов 1 и 2 и анализа результатов исследований [8] обоснована необходимость поэтапного проведения сбоек между уклонами на сближенных пластах. Для каждого этапа установлены формы и размеры зон запредельного состояния пород и разработаны паспорта крепления выработок. Принятые на основе моделирования решения по паспорту крепления утверждены и рекомендованы к внедрению техническим советом шахты.

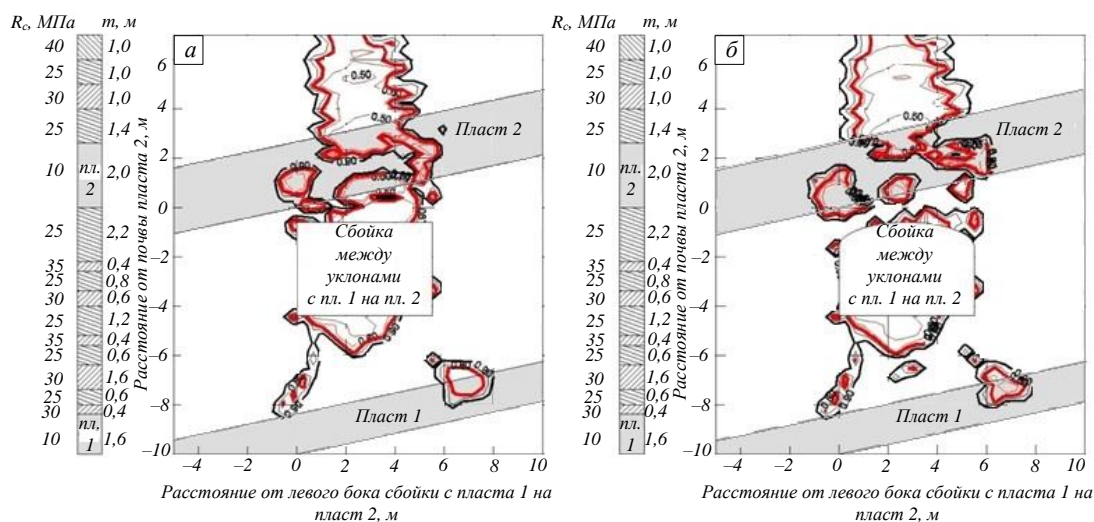


Рис. 5. Зоны разрушения пород при расположении сбойки у почвы пласта 2 (этап 3) при плоской (а) и полуарочной (б) форме кровли выработки

**Выводы.** Дано обоснование необходимости расчета крепи выработок, пройденных между выработками соседних угольных весьма сближенных пластов с выделением участков с однородными горно-геологическими параметрами горных пород. Методом математического моделирования установлены формы и размеры зон запредельного состояния пород. Разработаны рекомендации по креплению на различных участках выработок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
2. Бате Н., Вилсон Е. Численные методы анализа и численный метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
3. Оден Д. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
4. Фрянов В.Н., Петрова О.А., Петрова Т.В. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве: свидетельство о регистрации электронного ресурса. № 21123. Дата регистрации 03 августа 2015 года // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» № 08-09 (75-76). август-сентябрь 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper-05.php>. (Дата обращения 01.02.2017 г.).
5. Степанов А.В., Фрянов В.Н., Степанов Ю.А. Программа расчета геомеханических

параметров для исследования взаимодействия секции механизированной крепи с углепородным массивом // Свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ № 2001610645. Заявл. 02.04.2001; зарегистр. 31.05.2001. – М.: Роспатент, 2001.

6. Никитина А.М., Фрянов В.Н. Геомеханическое обеспечение устойчивости горных выработок в неоднородном углепородном массиве. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2009. – 199 с.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах». Приказ Ростехнадзора от 17 декабря 2013 года № 610 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах" (Зарегистрировано в Минюсте России 19.02.2014 г. № 31354). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499066486?block=9>. (Дата обращения 01.02.2017 г.).
8. Исаченко А.А., Риб С.В., Волошин В.А., Фрянов В.Н. Оценка геомеханического состояния углепородного массива в окрестности уклонов сближенных угольных пластов с использованием численного моделирования методом конечных элементов // ГИАБ. 2016. № 1. С. 294 – 302.

© 2017 г. А.А. Исаченко, А.А. Петров  
Поступила 01 февраля 2017 г.

*А.Н. Домрачев, С.В. Риб, А.М. Никитина*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ДЛИННОГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ

При разработке имитационной модели длинного комплексно-механизированного забоя [1] возникла задача оценки влияния неравномерности газовыделения из пласта на показатели очистных работ: нагрузку на очистной забой, коэффициент машинного времени и др.

Зависимость между скоростью продвижения очистного забоя и концентрацией метана в исходящей струе очистного забоя [2] получена в результате анализа данных с датчиков метана, однако ее непосредственное интегрирование в имитационную модель не представляется возможным.

Материалы наблюдений за метановыделением в очистных забоях высокопроизводительных шахт при работе комбайна свидетельствуют о значительных колебаниях показателей интенсивности метановыделения. В процессе очистной выемки угля комбайном отмечаются существенные повышения метановыделения относительно фонового уровня. Всплески зависят в основном от метаносности пласта в зоне выемки угля, производительности и времени непрерывной работы комбайна по добыче угля [3].

На текущее значение метановыделения оказывает влияние не только нагрузка в данный момент, но и прошлые события: добыча за прошлые смены, простои очистного оборудования и т.д. Во время технологических перерывов при обслуживании оборудования в ремонтную смену или при временной остановке комбайна в добычные смены процесс дренирования метана из угольного и породного массивов продолжается [4]. Происходит естественная дегазация горного массива в окрестности очистного забоя.

При расчете суточной нагрузки на длинный очистной забой в формуле присутствует коэффициент машинного времени, позволяющий учитывать только то время, в течение которого выемочная машина работает по отбойке и погрузке угля, то есть время массового интенсивного выделения метана в очистной забой [5].

Для адаптации имитационной модели очистного забоя было принято решение оценить неравномерность газовыделения за счет представления коэффициента неравномерности метановыделения  $k_{н.г}$  в виде случайного числа, распределенного

по нормальному закону и определяемому с использованием генератора случайных чисел [6, 7]. В качестве условия нормальной работы очистного забоя используется следующее неравенство

$$q_r m r \gamma v_{п} k_{н.г} < Q_{л} / 100,$$

где  $q_r$  – относительная газообильность пласта,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $m$  – вынимаемая мощность пласта,  $\text{м}$ ;  $r$  – ширина захвата шнека,  $\text{м}$ ;  $\gamma$  – плотность угля,  $\text{т}/\text{м}^3$ ;  $v_{п}$  – скорость подачи комбайна,  $\text{м}/\text{мин}$ ;  $k_{н.г}$  – коэффициент неравномерности метановыделения;  $Q_{л}$  – количество воздуха, поступающего в лаву,  $\text{м}^3/\text{мин}$ .

Если условие выполняется, то моделирование нагрузки на очистной забой производится без корректировки скорости подачи комбайна. Если условие не выполняется, возможны два варианта реагирования модели:

- имитация простоя комбайна, длительность которого определяется как случайная величина, определенная по нормальному или логнормальному закону распределения (см. рисунок, а);
- пересчет скорости подачи комбайна из учета выполнения условия (см. рисунок, б).

Для выбора варианта решения поставленной задачи было выполнено моделирование нагрузки на очистной забой и коэффициента машинного времени при трех различных параметрах розыгрыша коэффициента неравномерности газовыделения как случайной величины с последующим дисперсионным анализом полученных результатов. Для каждого набора параметров розыгрыша коэффициента  $k_{н.г}$  имитировали работу очистного забоя в течение 15 суток и определяли ежесуточный коэффициент машинного времени  $K_m$ . Средние значения результатов моделирования приведены ниже:

Набор параметров 1		Набор параметров 2		Набор параметров 3	
$k_{н.г}$	$K_m$	$k_{н.г}$	$K_m$	$k_{н.г}$	$K_m$
1,27	0,40	1,55	0,35	1,10	0,46

Так как с учетом специфики модели на значение данного коэффициента  $k_{н.г}$  оказывали влияние и другие факторы (прежде всего надежность элементов очистного механизированного комплекса)

был выполнен дисперсионный анализ, позволяющий оценить влияние изменения коэффициента неравномерности газовыделения по критерию  $F$  Фишера-Снедекора при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

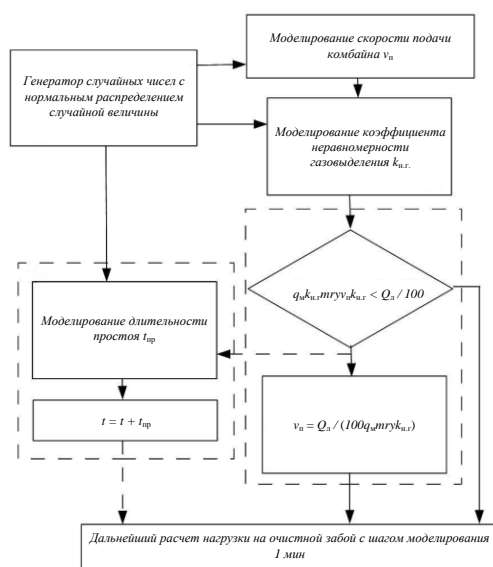
По результатам анализа наблюдаемое значение критерия  $F_{\text{наб}}$  составило 15,4. Критическое значение критерия  $F_{\text{кр}}(2,42; 0,05) = 3,22$ . Следовательно  $F_{\text{наб}} > F_{\text{кр}}$ , а это позволяет отвергнуть гипотезу о равенстве средних значений  $K_m$  при различных параметрах розыгрыша  $k_{н,г}$  и, таким образом, подтвердить наличие влияния неравномерности метановыделения при использовании пересчета скорости подачи комбайна по условию необходимости поддержания концентрации метана на исходящей струе очистного участка не более 1 %.

**Выводы.** Предлагаемый алгоритм может рассматриваться в качестве базового для адаптации имитационной модели длинного комплексно-механизированного забоя к условиям действующих шахт юга Кузбасса и дальнейшей разработке имитационной модели подготовки и отработки пологого пласта средней мощности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Домрачев А.Н., Риб С.В. Сравнительная оценка аналитического расчета и результатов имитационного моделирования нагрузки на длинный комплексно-механизированный очистной забой // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2016. № 3. С. 8 – 10.
2. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г. Возможность использования шахтного оборудования для прогнозирования газодинамических явлений при неравномерном подвигании очистного забоя. – В кн.: Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. статей. Вып. 1. / Под общ. ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. С. 129 – 134.
3. Забурдяев В.С. Метановыделение в очистных забоях при высоких нагрузках на лаву // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 1. С. 195 – 211.
4. Кудинов Ю.В. Зависимость метанообильности очистного забоя от неравномерности добычи угля // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 3. С. 98 – 102.
5. Ермолаев А.М., Кобылянский М.Т., Адамков А.В., Попов В.Б., Сурков А.В. К анализу расчетных формул предельной нагрузки на очистной забой угольных шахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013. № 1-1. С. 133 – 139.
6. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery. Numerical Recipes in C++ // Cambridge University Press, 2002. – 976 p.
7. Домрачев А.Н., Лукин К.Д. К вопросу об особенностях реализации генераторов случайных чисел при моделировании воспроизводства очистного фронта на шахте // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 24 – 27.

© 2017 г. А.Н. Домрачев,  
С.В. Риб, А.М. Никитина  
Поступила 13 февраля 2017 г.



Алгоритм моделирования нагрузки на очистной забой

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

УДК 621.967.1:621.77

Я.М. Стерлигова, Е.И. Демина

Сибирский государственный индустриальный университет

## АНАЛИЗ РАБОТЫ НОЖНИЦ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛА

Несмотря на успешное развитие материаловедения, проявляющееся в создании новых сплавов, композиционных материалов, новых структур и др., современные технологии практически во всех отраслях основаны на использовании черных материалов – до 70 % от всего объема [1]. Поэтому производство проката, выпуск новых профилей является современной и актуальной проблемой. Наличие затянувшегося мирового экономического кризиса привело к возрастанию конкуренции за рынок металла, где победителем окажется тот производитель, который выпускает продукт с наиболее точными и экономичными профилями. Такие условия обеспечивают постоянное возрастание требований не только к качеству производимого проката, но и к максимально возможной точности раскроя, что дает экономию металла производителю и пользователю прокатной продукции.

Резка проката в соответствии с заданными размерами осуществляется на ножницах разного типа и конструкции, что на современном этапе определяет повышенный интерес и к технологии резки, и к самим ножницам.

Кроме вышепредставленных соображений по ресурсосбережению, не менее важным является и аспект энергосбережения [2, 3].

Все это определяет цель при исследовании работы ножниц для резки металла – обеспечение ресурсо- и энергосбережения в технологическом процессе резки металлопроката. Задачи, решение которых обеспечит достижение поставленных целей, могут быть определены при изучении и анализе процесса резки.

Даже при больших различиях в технологии резания, типах и конструкциях ножниц можно выделить основной параметр – механизм резки. Наиболее распространенным («базовым») является процесс с нижним резом на параллельных ножах [4]. На рис. 1 представлена схема установки для резки раската.

Нижний нож смонтирован на суппорте (ползуне), который может подниматься с помощью электромеханического (кривошипного) или гидравлического привода. Верхний нож

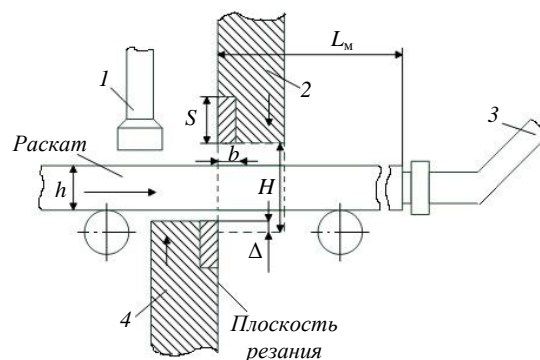


Рис. 1. Схема резки раската на ножницах с параллельными ножами: 1 – прижим; 2 – верхний нож; 3 – передвижной упор; 4 – нижний нож

также установлен на суппорте и может перемещаться по вертикали. Для фиксации положения разрезаемого раската используется прижим.

Перед началом процесса резки нижний нож находится ниже уровня роликов рольганга, и раскат входит в зазор между верхним и нижним ножами. Металл останавливается при помощи упора (на схеме не показан). Затем суппорт верхнего ножа опускается до контакта с поверхностью металла. При дальнейшем подъеме нижнего ножа начинается процесс резания.

В соответствии с данными работ [4, 5] процесс резания состоит из трех периодов (рис. 2): 1 – вмятие ножей в металл, при этом усилие на ножи постепенно увеличивается до максимального значения  $P_{\max}$ ; 2 – собственно резание (сдвиг металла по плоскости резания); 3 – скалывание (отрыв) оставшейся неразрезанной части.

Длительность первого периода характеризуется коэффициентом  $E_B$ , равным отношению глубины  $z_B$  внедрения ножей в металл при вмятии к исходной высоте  $h$  сечения металла, т. е.  $E_B = z_B / h$ .

Во втором периоде, по окончании вмятия ножей в металл, возникшее усилие превышает механический предел прочности металла, и начинается касательная деформация (сдвиг) металла, что выражается как

$$P_{\max} = \tau_{\max} F_{\text{рез}} = k_1 \sigma_B F_{\text{рез}}, H, \quad (1)$$



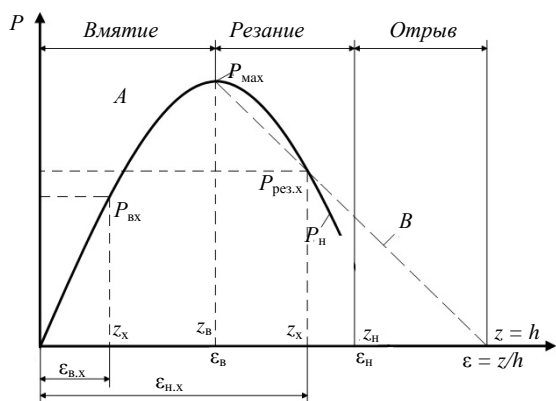


Рис. 2. Изменение усилия на ножи при резании в зависимости от глубины внедрения ножей:

A – экспериментальная кривая; B – прямая на участке разреза

где  $\tau_{\max}$  – максимальное касательное напряжение при резании (сдвиге металла), Н/м<sup>2</sup>;  $F_{\text{рез}}$  – сечение металла в момент начала сдвига (резания), м<sup>2</sup>;  $k_1 = \tau_{\max} / \sigma_b$  – коэффициент, равный отношению максимального сопротивления срезу к пределу прочности.

В момент окончания вмятия ножей (начало собственно процесса резания) высота сечения металла равна  $h - z_b = h(1 - E_b)$ , соответственно площадь начала резания составит

$$F_{\text{рез}} = h(1 - E_b)b = hb(1 - E_b),$$

где  $b$  – ширина полосы металла.

Поскольку при резании будет происходить изменение толщины раската (глубины площади сдвига), то возникает линейное уменьшение требуемого усилия резания.

В третьем периоде при достижении некоторой толщины за счет распорных усилий (рис. 2) будет происходить обрыв (скалывание) необрезанной части, поэтому кривая усилий в ножницах представлена штриховой линией как гипотетическое допущение.

Таким образом, величиной, определяющей эффективную работу ножниц, является значение максимального усилия резания. Для практических условий резания полученное аналитическое выражение (1) требует некоторых корректив, с учетом чего окончательная расчетная формула будет иметь следующий вид:

$$P_{\max} = k_1 k_2 k_3 \sigma_b hb(1 - E_b), \quad (2)$$

где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение усилий реза при затуплении ножей;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий повышение усилий реза при увеличении бокового зазора между ножами.

И если смысл введения коэффициента  $k_2$  очевиден, то для  $k_3$  нужны некоторые разъяснения с использованием рис. 1.

При вмятии ножей раскат будет стремиться к повороту по часовой стрелке под действием момента, равного  $P_a$ . При этом со стороны кромок ножей возникнут горизонтальные усилия  $T$ , создающие момент  $T_l = P_a$ . Очевидно, что с увеличением зазора между ножами, определяющего величину  $\alpha$ , горизонтальные усилия  $T$  будут возрастать, что требует затраты дополнительной мощности. Аналитически не представляется возможным определить величины  $\alpha$  и  $l$ , поэтому невозможно теоретически вычислить дополнительные затраты усилия. Из практики находят следующие значения:

– при горячем резании  $k_2 = 1,10 \div 1,20$ ;  $k_3 = 1,15 \div 1,25$ ;

– при холодном резании  $k_2 = 1,15 \div 1,25$ ;  $k_3 = 1,20 \div 1,30$ .

Выражение (2) является основным для определения отдельных направлений (задач), на решении которых следует сосредоточиться на повышении ресурсо- и энергосбережения работы ножниц по резке проката. При этом чисто формально каждая составляющая этого выражения, за исключением коэффициента  $k_1$ , может рассматриваться как некий регулирующий фактор. Величина  $\tau_{\max} / \sigma_b = k_1$  приводится в работе [4]:

- для мягких металлов  $k_1 \approx 0,6$ ;
- для твердых металлов  $k_1 \approx 0,7$ .

Необходимо отметить, что здесь не определена граница различия твердых и мягких металлов. Логично было бы предполагать, что это, хоть и приближительная, но постоянная величина, связанная и зависящая от молекулярного строения металла, и не может быть изменена без качественного изменения самого материала.

Все остальные величины можно рассматривать как оперативный фактор для достижения поставленной цели. Существующие технологии и оборудование для резки металла являются подтверждением этого.

Например, гильотинные ножницы с наклонным ножом используют геометрический фактор – поскольку нельзя изменить геометрию раската, определяемую параметрами  $h$  и  $b$ , то наклон ножа приводит к тому, что режется не вся полоса, а только какой-то треугольник сечения и это позволяет резко снизить требуемое максимальное усилие резания.

Другие конструкции ножниц (дисковые, ленточные и др.) соответствуют требованиям технологий и не более того. Если при периодиче-



ском процессе нарезания листов (кроме полосы) используются гильотинные ножницы, то для обрезки, особенно при непрерывной прокатке, используются дисковые ножницы.

Вторым членом выражения (2) по своей значимости является коэффициент вмятия  $E_v$ . Из структуры формулы (2) следует, что чем больше коэффициент вмятия, тем меньше  $P_{\max}$ . Представленные в работе [4] таблицы показывают, как можно использовать эту зависимость.

Ниже приведены экспериментальные значения коэффициента вмятия  $E_v$ :

Марка стали	Значение коэффициента $E_v$ при	
	горячем резании	холодном резании
10	0,32 – 0,40	0,30
20	0,30 – 0,35	0,25
50	0,25 – 0,30	0,20
53С2	0,25 – 0,28	0,20
12Х18Н9Г	0,25 – 0,30	0,35
ШХ15	0,20 – 0,25	0,15

Так как для всех марок сталей при горячем резании значение  $E_v$  всегда больше, чем при холодном, то из этого следует, что при проектировании и реализации прокатных технологий необходимо отдавать предпочтение «горячим» процессам. Учитывая, что прокатное производство является многоэтапным и может включать в себя несколько переделов, то использование «горячего» металла приведет к значительной экономии ресурсов, что очень важно, т.к. металлургия является энергоемким производством (17 % всего используемого в стране природного газа потребляется в черной металлургии [6]).

Оставшиеся два члена  $k_2$  и  $k_3$  формулы (2) являются наиболее действенными. Если сравнить их произведения на низшем уровне ( $k_2 \cdot k_3$  низшее и  $k_2 \cdot k_3$  высшее), то можно увидеть очень большую разницу: 25 – 50 %. Эта величина и показывает возможный резерв снижения максимального усилия резания.

Коэффициент  $k_2$  определяет состояние ножей и возрастает по мере их затупления. Очень важно организовать контроль над состоянием ножей, который сводится к следующим основным мероприятиям:

- выбор сплава режущих кромок;
- наплавка специальных материалов;
- периодический осмотр и смена режущих кромок;

- набор статистических данных по работе ножей для разных марок стали, профилей и других условий эксплуатации;

- создание системы прогнозно-плановой замены ножей.

Коэффициент  $k_3$  учитывает положение ножей и для его снижения необходимо осуществлять следующее:

- регулярный контроль зазора;
- регистрацию усилий поджатия и контроль над соответствующим оборудованием;
- автоматическое поджатие ножей друг к другу.

Процесс резки металла является немаловажным звеном в полном цикле производства металлопроката. Одним из способов снижения энергозатрат при резке проката является технология резки предварительно изогнутой полосы [7], при которой усилие резания меньше, чем при резке прямой полосы на 40 %.

**Выводы.** При дальнейшей оптимизации работы ножей по резке металла возможно снижение энергозатрат на производство и обеспечение надлежащего качества выпускаемой продукции, что в свою очередь и определяет конкурентоспособность предприятия производителя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Темлянец М.В., Темлянец Н.В. Металлургия черных металлов и теплотехника. История развития науки и техники с древнейших времен до наших дней: учеб. пособие – М.: Теплотехник, 2008. – 170 с.
2. Электронный ресурс [www.unfcc.int](http://www.unfcc.int)
3. Государственная программа РФ по энергосбережению и повышению энергетической эффективности на период до 2020 г. (Утверждена Постановлением Правительства РФ от 27.12.2010 г. № 2446-р).
4. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. – М.: Металлургия, 1988. Т. 3. – 680 с.
5. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. – М.: Металлургия, 1987. – 480 с.
6. Хрестоматия энергосбережения / Под ред. В.Г. Лисиенко. В 2-х томах. – М.: Теплоэнергетик, 2002. Т. 1. – 586 с.
7. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Демина Е.И. Определение усилия резания на ножницах предварительно изогнутой полосы // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 5. С. 386, 387.

© 2017 г. Я.М. Стерлигова, Е.И. Демина  
Поступила 14 февраля 2017 г.

**ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 620. 193

*И.Н. Ганиев, Н.М. Муллоева, О.Х. Ниёзов, Б.Б. Эшов, Ф.К. Ходжаев*

Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан

**ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СВИНЦА В НЕЙТРАЛЬНОЙ СРЕДЕ**

Сильное влияние на коррозионное поведение свинца как в условиях анодной поляризации, так и в ее отсутствие оказывают *s*- и *p*-элементы, которые имеют близкие к свинцу параметры решетки, а также образуют в сплавах с ним твердые растворы и промежуточные фазы. Элементы с очень ограниченной растворимостью в свинце как легирующие компоненты не эффективны. В отсутствие внешней поляризации коррозия сплавов определяется химическими и электрохимическими свойствами компонентов, их продуктами взаимодействия с раствором и структурой сплавов. По отношению к свинцу щелочноземельные металлы являются анодной составляющей [1].

Как правило, потенциалы промежуточных фаз, твердых растворов и эвтектических образований приобретают значения между величинами потенциалов компонентов сплава. Добавки более электроположительных, чем свинец, металлов усиливают процесс растворения свинца только в начальный период. Однако в последующий период при формировании фазового слоя из сульфата свинца (в растворах  $H_2SO_4$ ) этот процесс резко замедляется, а потенциал достигает такого значения, при котором становится возможным и растворение катодной составляющей, особенно в случае образования хорошо растворимых солей [1].

Коррозионно-электрохимические свойства сплавов свинца с щелочноземельными металлами изучены в растворах  $H_2SO_4$  в связи с разработкой состава сплавов для аккумуляторных пластин. Данных о коррозионном поведении сплавов в нейтральной среде электролита  $NaCl$  в научной литературе не обнаружено, кроме работ [2, 3]. Имеющиеся сведения о поведении двойных сплавов систем  $Pb-Ca$  ( $Sr, Ba$ ) в растворах  $H_2SO_4$  показывают на определенную взаимосвязь между коррозионными, потенциометрическими и другими параметрами сплавов с диаграммами состояния, т. е. со строением сплавов. Наиболее характерные изменения в свойствах соответствуют преимущественно однофазным сплавам, по составу

примыкающим к границе перехода от области растворимости металла в свинце к эвтектике из твердого раствора и интерметаллического соединения. Коррозионное поведение сплавов также определяется растворимостью продуктов коррозии второго компонента. Этот фактор играет определенную роль в условиях анодной поляризации. Добавки щелочноземельных металлов к свинцу более эффективны, чем добавки щелочных металлов потому, что их сульфаты менее растворимы, чем соли щелочных металлов. Кроме того, кальций, стронций и барий имеют аналогичную свинцу кубическую решетку [1].

В системах  $Pb-Ca$  ( $Sr, Ba$ ) со стороны свинца кристаллизуется эвтектика между твердым раствором щелочноземельных металлов в свинце и интерметаллидом состава  $Pb_3ЩЗМ$  (где  $ЩЗМ - Ca, Sr, Ba$ ). Растворимость щелочноземельных металлов в свинце при температуре эвтектики не превышает 0,8 – 1,0 % (ат.), или 0,2 – 0,4 % (по массе) [4 – 6].

Для исследования анодного поведения свинца, легированного  $ЩЗМ$ , сплавы были получены исходя из диаграммы состояния  $Pb - ЩЗМ$  с учетом растворимости  $ЩЗМ$  в свинце, т.е. были охвачены области растворимости  $ЩЗМ$  в свинце, а также доэвтектическая область  $\alpha-Pb + ЩЗМРb_3$ . Сплавы получали из металлического свинца марки  $CO$  и их лигатур с 5 % (по массе)  $ЩЗМ$ .

Сплавы содержали  $ЩЗМ$  от 0,005 до 0,5 % (по массе), что составило стократное увеличение концентрации легирующего компонента. Из полученных сплавов отливались цилиндрические образцы диам. 8 мм и длиной 100 мм, торцевая часть которых служила рабочим электродом.

Электрохимические исследования полученных образцов сплавов проводились потенциостатическим методом на потенциостате ПИ-50-1.1 при скорости развертки потенциала 2 мВ/с. Исследования выполнены в среде электролита  $NaCl$  с концентрацией 0,03; 0,3 и 3,0 %. Для сравнения служил хлорсеребряный электрод,

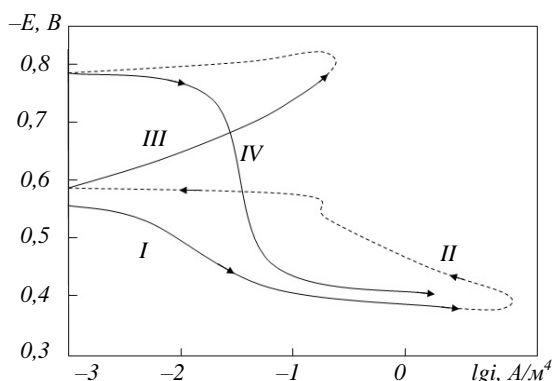


Рис. 1. Полная поляризационная ( $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ ) кривая свинца в среде электролита 3 %-го NaCl

стандартным – платиновый. Методика исследования описана в работах [7 – 12].

В качестве примера на рис. 1 представлена полная потенциодинамическая кривая свинца. Первоначально после установившегося значения потенциала коррозии кривая шла в положительном направлении до плотности тока  $2 \text{ А/м}^2$  (рис. 1, кривая I), затем возвращалась назад (рис. 1, кривая II), далее шла в катодную область до потенциала  $-0,8 \text{ В}$  (рис. 1, кривая III) и затем снова в положительном направлении (рис. 1, кривая IV). По потенциодинамической кривой определяли основные электрохи-

мические характеристики сплавов – потенциалы питтингообразования ( $E_{п. о}$ ) и репассивации ( $E_{р. п}$ ) как пересечение прямого и обратного хода анодных кривых; потенциал коррозии (после освобождения от оксидной пленки).

Обобщенные результаты исследования сплавов систем Pb – Ca (Sr, Ba) представлены в табл. 1 и 2. Потенциал свободной коррозии сплавов систем Pb – Ca (Sr, Ba) с ростом концентрации щелочноземельного металла смещается в положительном направлении оси ординат. С увеличением концентрации хлорид-ионов потенциал свободной коррозии чистого свинца смещается в отрицательном направлении от  $-0,524 \text{ В}$  в среде 0,03 % NaCl до  $-0,562 \text{ В}$  в среде 3 % NaCl (табл. 1).

Такая зависимость имеет место также для сплавов свинца с ЩЗМ, т. е. при переходе от слабого электролита к более сильному наблюдается уменьшение потенциала свободной коррозии независимо от содержания легирующего компонента. Значения потенциалов питтингообразования и репассивации чистого свинца и его сплавов с ЩЗМ также по мере роста концентрации хлорид-ионов в электролите смещаются в более отрицательную область. Увеличение концентрации легирующего компонента способствует росту значений

Т а б л и ц а 1

**Потенциалы свободной коррозии ( $-E_{св.корр.}$ , В) и питтингообразования ( $-E_{п.о.}$ , В) сплавов систем Pb–Ca(Sr, Ba) в среде электролита NaCl**

Содержание ЩЗМ, % (по массе)	Сплавы с Ca		Сплавы со Sr		Сплавы с Ba	
	$-E_{св.корр.}$ , В	$-E_{п.о.}$ , В	$-E_{св.корр.}$ , В	$-E_{п.о.}$ , В	$-E_{св.корр.}$ , В	$-E_{п.о.}$ , В
0,03 % NaCl						
–	0,524	0,380	0,524	0,380	0,524	0,380
0,005	0,520	0,369	0,510	0,330	0,512	0,340
0,010	0,518	0,354	0,500	0,320	0,484	0,330
0,050	0,506	0,340	0,480	0,300	0,464	0,310
0,100	0,475	0,325	0,450	0,280	0,442	0,300
0,500	0,422	0,320	0,430	0,250	0,428	0,280
0,3 % NaCl						
–	0,543	0,420	0,543	0,420	0,543	0,420
0,005	0,488	0,340	0,520	0,350	0,536	0,380
0,010	0,470	0,340	0,510	0,350	0,522	0,360
0,050	0,420	0,310	0,503	0,310	0,516	0,340
0,100	0,400	0,306	0,408	0,305	0,510	0,340
0,500	0,384	0,300	0,440	0,300	0,500	0,320
3,0 % NaCl						
–	0,562	0,450	0,562	0,450	0,562	0,450
0,005	0,460	0,320	0,540	0,370	0,560	0,400
0,010	0,450	0,310	0,536	0,380	0,550	0,380
0,050	0,408	0,300	0,532	0,340	0,546	0,360
0,100	0,380	0,260	0,523	0,350	0,530	0,340
0,500	0,368	0,250	0,522	0,325	0,524	0,340

**Зависимость скорости коррозии сплавов систем Pb–Ca (Sr, Ba)  
от содержания ЦЗМ в среде электролита NaCl**

Содержание ЦЗМ, % (по массе)	Скорость коррозии					
	сплавов с Ca		сплавов со Sr		сплавов с Ba	
	$i_{корр} \cdot 10^{-2}$	$K \cdot 10^{-3}$	$i_{корр} \cdot 10^{-2}$	$K \cdot 10^{-3}$	$i_{корр} \cdot 10^{-2}$	$K \cdot 10^{-3}$
	A/м <sup>2</sup>	г/(м <sup>2</sup> ·ч)	A/м <sup>2</sup>	г/(м <sup>2</sup> ·ч)	A/м <sup>2</sup>	г/(м <sup>2</sup> ·ч)
0,03 % NaCl						
–	0,80	15,44	0,80	15,44	0,80	15,44
0,005	0,77	14,86	0,69	13,31	0,71	13,70
0,010	0,60	11,58	0,54	10,42	0,57	11,00
0,050	0,53	10,23	0,48	9,26	0,54	10,42
0,100	0,42	8,11	0,40	7,72	0,45	8,68
0,500	0,36	6,95	0,36	6,85	0,40	7,72
0,3 % NaCl						
–	0,85	16,40	0,85	16,40	0,85	16,40
0,005	0,68	13,12	0,72	13,89	0,74	14,28
0,010	0,55	10,61	0,57	11,00	0,60	11,58
0,050	0,49	9,46	0,50	9,65	0,56	10,80
0,100	0,38	7,33	0,42	8,10	0,48	9,26
0,500	0,33	6,37	0,38	7,33	0,43	8,30
3,0 % NaCl						
–	0,98	18,91	0,98	18,91	0,98	18,91
0,005	0,62	11,97	0,83	16,01	0,86	16,50
0,010	0,53	10,23	0,63	12,15	0,65	12,55
0,050	0,42	8,11	0,55	10,61	0,60	11,58
0,100	0,32	6,18	0,48	9,26	0,52	10,04
0,500	0,28	5,40	0,42	8,10	0,47	9,07

потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах независимо от концентрации хлорид-ионов. Установленные зависимости характерны для сплавов свинца со всеми щелочноземельными металлами. При переходе от сплавов свинца с кальцием к сплавам со стронцием и с барием потенциал свободной коррозии уменьшается, т.е. изменяется в отрицательном направлении оси ординат; потенциал питтингообразования также уменьшается (табл. 1).

Плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии сплавов систем Pb – Ca (Sr, Ba) с ростом концентрации хлорид-ионов увеличивается. Такая зависимость характерна для всех сплавов независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств легирующего компонента. При переходе от сплавов свинца с кальцием к сплавам со стронцием и барием наблюдается рост скорости коррозии, что коррелирует со свойствами самих щелочноземельных металлов. Для чистого свинца также характерен рост скорости коррозии с увеличением концентрации хлорид-ионов в электролите (табл. 2).

Анодные ветви потенциодинамических кривых сплавов систем Pb – Sr в средах 3,0 %

и 0,3 %-ого NaCl (рис. 2) показывают, что кривые, относящиеся к сплавам, располагаются левее кривой чистого свинца, т.е. скорость анодной коррозии сплавов несколько меньше, чем у свинца во всех исследованных средах. Положительное действие щелочноземельных металлов на анодные свойства свинца не могут объясняться только увеличением истинной поверхности анода или уплотнением. Стойкость свинца зависит также от изменения и модифицирования его защитного фазового слоя оксидов малорастворимыми продуктами окисления структуры при легировании, т.е. от величины кристаллов сплавов.

Как известно, модификаторами структуры сплава могут служить металлы, имеющие малую межатомную связь и, следовательно, низкую температуру плавления, малые прочность и твердость [13 – 15].

Адсорбируясь на зарождающихся кристаллах, они тормозят их рост, уменьшают поверхностную энергию вновь зарождающегося кристалла, в результате чего образуется высокодисперсный сплав. По величине обобщенного момента, характеризующего абсорбционную способность элементов в зависимости от заряда и эффективного радиуса иона [15], элементы

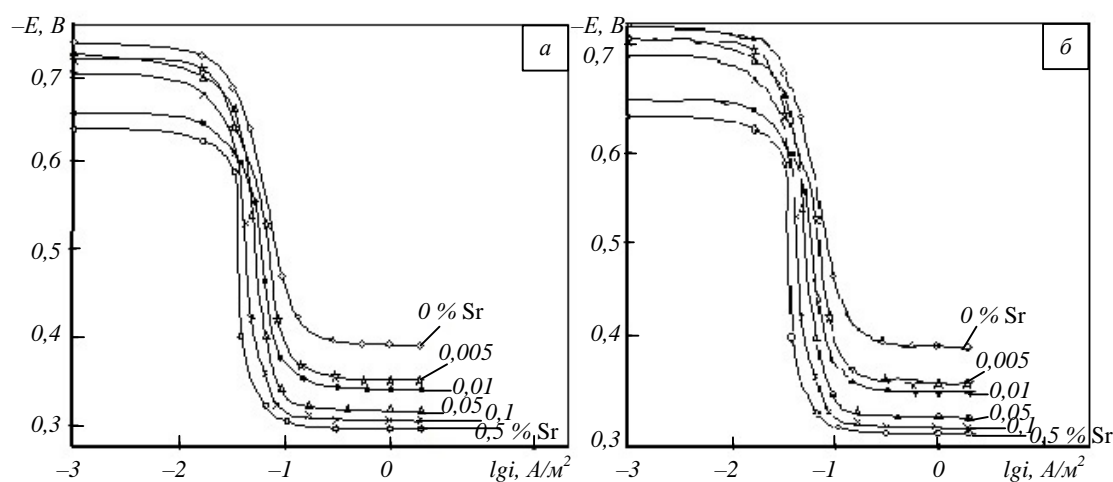


Рис. 2. Анодные ветви потенциодинамических ( $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ ) кривых сплавов системы Pb – Sr с различным содержанием стронция в среде электролита 3 % (а) и 0,3 % (б) NaCl

подгруппы кальция можно расположить в следующий ряд:  $\text{Ca}^{2+}_{9,04} - \text{Sr}^{2+}_{7,49} - \text{Pb}^{2+}_{7,1} - \text{Ba}^{2+}_{6,63}$ . Металлы, расположенные в ряду левее свинца, являются неактивными модификаторами, а правее – активными, хотя на практике, как видно из табл. 2, это не подтверждается [1], т.е. кальций и стронций являются более эффективными модификаторами структуры свинца, чем барий. Кроме близких величин обобщенного момента, необходимо учитывать растворимость и свойства солей, образуемых катионами, например кальцием, стронцием, барием.

Диффузия в металлах происходит быстрее вдоль границ зерен, чем в самих зернах. Наличие границ зерен в поликристаллах влияет на такие свойства, как внутреннее трение, пластичность и др. [1]. В случае диспергирования структуры продукты коррозии полностью перекрывают незначительную по величине межкристаллитную прослойку и этим усиливают пассивность металла. Таким действием чаще всего обладают *s*- и *p*-элементы, к которым относятся и щелочноземельные металлы. Таким образом, существует связь между увеличением коррозионной стойкости и изменением зернистости сплава, что подтверждает существующие представления о роли модификаторов в коррозии сплавов. Как отмечалось выше, растворимость щелочноземельных металлов в свинце составляет 0,2 – 0,4 % (по массе) при температуре эвтектики. Ближайший к свинцу интерметаллид состава  $\text{Pb}_3\text{ЩЗМ}$  образует с ним эвтектику Pb +  $\text{Pb}_3\text{ЩЗМ}$ . Как известно, при переходе границы растворимости на кривой зависимости состав – свойства наблюдается излом, что соответствует точке предельной растворимости второго компонента в металле – основе (свинце). Нами исследованы электро-

химические характеристики сплавов систем Pb – Ca (Sr, Ba), содержащих до 0,5 % (по массе) ЩЗМ. В изученном диапазоне концентрации зависимость плотности тока коррозии от состава характеризуется монотонным изменением, т.е. отсутствует точка перегиба, характерная для перехода границы области твердого раствора ЩЗМ в свинце. Как известно, при переходе от однофазной области к двухфазной на кривой зависимости состав – свойства наблюдается перегиб.

Это наводит на мысль о некотором несопадении имеющихся в литературе данных о растворимости ЩЗМ в свинце с реально существующими. Таким образом, ЩЗМ в количестве до 0,5 % (по массе), растворяясь в свинце, модифицируют кристаллическую структуру свинцового твердого раствора, не изменяя его фазовый состав и тем самым повышают анодную устойчивость металла.

**Выводы.** Установлено, что легирование свинца щелочноземельными металлами до 0,5 % (по массе) повышает его анодную устойчивость в два раза в среде электролита NaCl. При этом с ростом концентрации легирующего компонента отмечается смещение в положительном направлении потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации. С увеличением концентрации хлорид-ионов в растворе потенциалы свободной коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов уменьшаются, скорость коррозии увеличивается.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дунаев Ю.Д. Нерастворимые аноды из сплавов на основе свинца. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1978. – 316 с.

2. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Обидов Ф.У. – В кн.: Материалы Республ. научно-практ. конф. «Методы повышения качества и целесообразности процессов производства». – Душанбе: изд. ТТУ им. М.С. Осими, 2011. С. 73 – 76.
3. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Обидов Ф.У., Эшов Б.Б., Махмадуллоев Х.А. – В кн.: Материалы Республ. научно-практ. конф. «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». – Душанбе: изд. ТТУ им. М.С. Осими, 2011. С. 156 – 158.
4. Вахобов А.В., Ганиев И.Н., Назаров Х.М. Металлургия кальция и его сплавов. – Душанбе: Дониш, 2000. – 178 с.
5. Назаров Х.М., Вахобов А.В., Ганиев И.Н., Джураев Т.Д. Барий и его сплавы. – Душанбе: Дониш, 2001. – 211 с.
6. Ганиев И.Н., Вахобов А.В., Назаров Х.М. Металлургия стронция и его сплавов. – Душанбе: Дониш, 2000. – 205 с.
7. Джайлоев Д.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Азимов Х.Х. // Изв. вуз. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 12. С. 38 – 42.
8. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И. Irene Calliari // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 1 (44). С. 49 – 53.
9. Раджабалиев С.С., Ганиев И.Н., Амонов И.Т. // Вопросы материаловедения. 2016. № 2 (86). С. 147 – 152.
10. Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Джайлоев Дж.Х. // Изв. вуз. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 2. С. 74 – 79.
11. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И. Irene Calliari // Вестник Магнитогорского Государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 2. С. 95 – 100.
12. Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш. // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 2 (45). С. 68 – 71.
13. Ганиев И.Н., Пархутик Г.А., Вахобов А.В., Куприянова И.Ю. Модифицирование силуминов стронцием. – Минск: Наука и техника, 1985. – 143 с.
14. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
15. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. – М.: Изд-во научно-техн. литературы, 1956. – 135 с.

© 2017 г. И.Н. Ганиев, Н.М. Муллоева,  
О.Х. Ниезов, Б.Б. Эшов, Ф.К. Ходжаев,  
Поступила 18 января 2017 г.



УДК 536.66:662.61

**В.В. Стерлигов, Е.С. Татарина, И.В. Чикурова**

Сибирский государственный индустриальный университет

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ  
УГЛЕРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТОПЛИВА**

В существующих оценках экологической ситуации в мире все чаще начинают доминировать пессимистические прогнозы. И это относится не только к зарубежным средствам медиа. В России, и что еще важнее для нас – в Кузбассе, появляются материалы, предрекающие бедственную экологию угольного Кузбасса. Написанные непрофессионалами, такие публикации могут возбудить негативную реакцию у неподготовленных читателей.

Между тем, дело не обстоит так трагически и в этот период нужна объективная наилучшая информация, которая, признавая ситуацию нелегкой, искала бы и предлагала пути решения этой проблемы. В базовом документе, созданном международным сообществом по проблеме потепления климата, так называемой «Рамочной конвенции по изменению климата» (РКИК) [1], в п. 2 записано положение о предосторожности, которое призывает человечество изыскивать средства, даже если они еще научно и не представлены. Это определяют сверхактуальности любой работы, направленной на решение глобальной проблемы парникового эффекта.

В другом документе, созданном для реализации РКИК, так называемом «Киотском протоколе» [2], в ст. 5 содержится определение основной меры борьбы с потеплением, вызванным парниковым эффектом, – это энергосбережение, приводящее к снижению выбросов парниковых газов, которое может быть достигнуто за счет прямого уменьшения потребления топлива и особенно угля. На наш взгляд, – это примитивное и даже вульгарное решение за счет экстенсивного фактора. Но поскольку обществу для функционирования во всех своих областях необходима энергия, то более рациональным является разработка и внедрение новых способов использования топлива, которые бы давали пониженную эмиссию диоксида углерода – основного представителя парниковых газов.

Активность международного общества по этим энергоэкологическим проблемам до Рос-

сии еще не дошла. Достаточно сказать, что не все специалисты по защите атмосферы знают, что в России, как давно уже во всем мире, введена плата за выбросы диоксида углерода. Но если посмотреть один из наиболее авторитетных источников по энергоэкологическим проблемам [3], то в нем указана плата за выбросы  $SO_2$ ,  $NO_x$  и др., а за  $CO_2$  ее нет.

В том же Киотском протоколе отмечена необходимость вести учет выбросов  $CO_2$ , но пока в России в этом направлении практически ничего не делается. Поскольку страна взяла на себя обязательство продолжить работу по уменьшению выбросов  $CO_2$ , подписав в декабре 2015 г. Парижское соглашение [4], то необходимо готовиться к выполнению этих обязательств.

В настоящей работе представлена попытка упростить определение объемов эмиссии  $CO_2$  на основе элементарного состава (то есть по содержанию отдельных химических элементов) в противоположность расчету по химическому составу, определение которого трудоемко и не всегда доступно на любом предприятии.

**Расчет теплоты сгорания газообразного топлива по содержанию элементов****Расчетные зависимости для определения теплоты сгорания  $Q_n^p$  топлива**

Для газообразного топлива из теории горения [5] известно уравнение для определения теплоты сгорания:

$$Q_n^p = 39,847CH_4 + 107,43H_2 + 122,63CO + \\ + 63,790C_2H_4 + 590,59C_2H_4 + \\ + 942,81C_3H_8, \text{ кДж/м}^3, \quad (1)$$

где  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_8$  – процентное содержание компонентов топлива.

Следует отметить, что это уравнение является детерминированным, т.е. определенным на строгом соответствии законам физики и

химии. Аддитивная структура его определена отсутствием взаимодействия при горении различных компонентов. Численные коэффициенты учитывают тепловой эффект полного окисления.

Для твердых и жидких топлив в источнике [5] можно найти разные формулы, но наиболее употребляемой является так называемая «формула Менделеева»:

$$Q_n^p = 339C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$ ,  $S^p$ ,  $W^p$  – содержание на рабочую массу отдельных химических элементов.

Это уравнение регрессии, устанавливающее связь на основе статистических материалов. Аддитивный характер объясняется также независимостью горения отдельных элементов. Численные коэффициенты получены путем статистически обработанных результатов наблюдений.

В отличие от первой модели, где четко известно, какой элемент в комбинации с другим составляет то или иное вещество, количество которого нужно точно знать, как и тепловой эффект его окисления, вторая модель не предполагает знания комбинаций элементов, в ней нет сведений об их тепловых реакциях и т.д. Для этой модели нет необходимости в химическом анализе газа.

Нами была предложена идея об использовании удельной величины выбросов на единицу энергии ( $c$ ). Этот подход позволяет подобрать не просто богатое топливо, а такое, которое будет давать при этом меньше выбросов. Величина  $c$  определяется так:

$$c = \frac{m_{CO_2}}{Q_n^p}, \text{ кг/кДж}. \quad (3)$$

Поэтому важно быстро и оперативно определять значения  $Q_n^p$ . Очевидно, что вторая модель для твердого и жидкого топлива имеет преимущества. В дальнейшем твердое топливо будем называть уголь, а газообразное – газ.

Выдвигается гипотеза о том, что теплоту сгорания газообразного топлива и эмиссию углекислоты можно рассчитывать по более простой модели, используемой для угля. Для ее доказательства рассмотрим расчеты отдельных видов топлива.

### **Расчет горения чистого метана (100 % $CH_4$ )**

Как следует из второй модели, необходимо знать процентное содержание в метане углерода. Из формулы метана ( $CH_4$ ) видно, что масса С составляет 12 кг/кмоль, масса  $H_2$  – 4 кг/кмоль, или в процентном соотношении 75 % С и 25 %  $H_2$ .

Подставляя эти значения в формулу (2), найдем

$$(Q_n^p)_1 = 339 \cdot 75 + 1030 \cdot 25 = 51775 \text{ кДж/кг}.$$

Если рассчитать теплоту сгорания по формуле (1), получим

$$(Q_n^p)'_1 = 35847 \cdot 100 = 35847 \text{ кДж/м}^3.$$

Чтобы привести расчет этой величины к 1 кг, необходимо поделить результат на плотность метана  $\rho = 16/22,4 = 0,714 \text{ кг/м}^3$ , откуда получим

$$(Q_n^p)_2 = \frac{(Q_n^p)'}{\rho} = \frac{35847}{0,714} = 50206 \text{ кДж/кг}.$$

### **Расчет горения чистого пропана (100 % $C_3H_8$ )**

Из химической формулы  $C_3H_8$  имеем 81,81 % С и 18,19 %  $H_2$ . Плотность пропана  $\rho = 44/22,4 = 1,96 \text{ кг/м}^3$ .

По второй модели получим

$$(Q_n^p)_2 = 339 \cdot 81,81 + 1030 \cdot 18,19 = 46469 \text{ кДж/кг} = 46,469 \text{ МДж/кг}.$$

Если рассчитать эту же величину по химическому составу, то получим

$$(Q_n^p)'_1 = 91,981 \cdot 100 = 91981 \text{ кДж/м}^3 = 91,981 \text{ МДж/м}^3.$$

Пересчитаем эту величину на 1 кг газа, в результате имеем

$$(Q_n^p)_1 = \frac{(Q_n^p)'}{\rho} = \frac{91981}{1,96} = 46929 \text{ кДж/кг} = 46,929 \text{ МДж/кг}.$$

**Расчет газовой смеси**

Состав топлива представлен 85 % CH<sub>4</sub>, 10 % C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 3 % N<sub>2</sub>, 2 % CO.

Теплота сгорания этого топлива (по первой модели) определяется как

$$(Q_H^p)'_1 = 35,847 \cdot 85 + 63,790 \cdot 10 + 2,263 \cdot 2 = 37094 \text{ кДж/м}^3.$$

Представим аппроксимирующий расчет (на 1 кг):  
плотность газа составит

$$\rho_{\text{ан}} = \frac{\sum m_i r_i}{22,4} = \frac{\%CH_4 \cdot 16 + \%C_2H_4 \cdot 30 + \%N_2 \cdot 28 + \%CO \cdot 28}{22,4} = 0,7585 \text{ кг/м}^3;$$

масса водорода

$$m_H = m_{C_2H_4} + m_{C_2H_2} = 0,183, \text{ кг};$$

масса углерода

$$m_C = m_{C_2H_4} \cdot m_{C_2H_2} + m_{CO} = 0,5384, \text{ кг};$$

массовая доля углерода в топливе

$$\% C = \frac{m_C}{\rho_r} \cdot 100 = 71,65 \%;$$

доля водорода в газовом топливе

$$\% H = \frac{m_{H_2}}{\rho_r} \cdot 100 = 24,12 \%;$$

доля азота в газовом топливе

$$\% N_2 = \frac{m_{N_2}}{\rho_r} \cdot 100 = 4,34 \%;$$

доля кислорода в газовом топливе

$$\% O_2 = \frac{m_{O_2}}{\rho_r} \cdot 100 = 0,49 \%,$$

что в сумме составит

$$\Sigma = 71,65 + 24,12 + 4,34 + 0,49 = 100 \%.$$

В пересчете на 1 кг газа имеем

$$(Q_H^p)_1 = \frac{Q_H^p}{\rho_r} = \frac{37084}{0,7585} = 48904 \text{ кДж/кг} = 48,9 \text{ МДж/кг}.$$

При аппроксимирующем расчете теплоты сгорания газа по формуле Менделеева получим

$$(Q_H^p)_2 = 39 \cdot 71,05 + 1030 \cdot 24,12 = 24085 + 24843 = 48928 \text{ кДж/кг}.$$

Для всех трех случаев была определена погрешность аппроксимации по формуле:

$$\Delta Q = \frac{(Q_H^p)_1 - (Q_H^p)_2}{(Q_H^p)_1} = 100 \%.$$

За базовую взяли величину  $Q_H^p$ , рассчитанную по формуле (1).

Для всех трех случаев ошибка составила:  $\Delta Q_{CH_4} = -1,93 \%$ ,  $\Delta Q_{C_3H_8} = +1,4 \%$ , для смеси газов  $-0,7 \%$ , что является приемлемым уровнем ошибки для предлагаемой упрощенной методики расчета величины  $Q_H^p$ .

**Алгоритм расчета удельной оценки топлива**

Поскольку гипотеза о применимости элементарного состава для расчета теплоты сгорания принята для газообразных топлив, то ее можно использовать для оценки потенциала эмиссии углекислоты и определения удельной величины выбросов  $m_{CO_2}$ , отнесенной к единице выделенной энергии, т.е.

$$m_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{Q_H^p}.$$

Это выражение является ключевым, и предлагается следующий алгоритм для действующего теплотехнического агрегата.

1. Определяется тепловая мощность агрегата  $N$ , кВт. Как правило она известна даже на стадии проектирования, поэтому предлагаемая методика выбросов CO<sub>2</sub> может использоваться как для прогнозирования эмиссии, так и при исследовании действующих агрегатов;

2. Рассчитывается потребное количество энергии на основе нормативных или практических данных по работе агрегата:

$$E = eN, \text{ кВт},$$

где  $e$  – нормативный удельный показатель расхода энергии на единицу продукции;

3. Осуществляется выбор топлива, если существует возможность разных вариантов, и определяется его расход  $G$ , кг/с (т/ч):

$$G = \frac{E}{Q_H^p}, \text{ кг/с (м}^3\text{/с)};$$

здесь  $Q_H^p$  – теплота сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

4. По составу топлива (угля) определяется масса углерода  $M_C$

$$M_C = G \cdot \%C, \text{ кг/с};$$

5. По формуле (2) определяют величину  $Q_H^p$ .

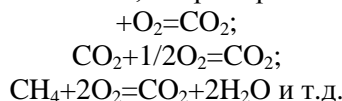
В случае использования газового топлива массу углерода рассчитывают суммированием вкладов всех углеродсодержащих компонентов топлива, т.е.

$$M_C = \sum_{i=1}^n M_{C_i},$$

что возможно при знании состава топлива.

#### Определение массовой эмиссии $CO_2$

В основе расчета лежит материальный баланс горения любого углеродсодержащего компонента топлива, например



Из этих уравнений реакций следует, что для любого углеводорода при полном горении (а в действующем теплотехническом агрегате конечно необходимо добиваться полного сжигания топлива) 1 атом С генерирует 1 молекулу

$CO_2$ ; соотношение масс  $\frac{m_{CO_2}}{m_C} = 44/12 = 3,67 =$

const. Это дает возможность определить прогнозируемый выброс углекислоты:

$$M_{CO_2} = 3,67 \cdot M_C, \text{ кг/с},$$

и наоборот

$$M_C = \frac{M_{CO_2}}{3,67}.$$

Для определения содержания углерода (% по массе в топливе) достаточно произвести сжигание топлива и по содержанию  $CO_2$  в продуктах сгорания определить содержание углерода в топливе и его массу.

Если предполагается выбор топлива, то эти расчеты необходимо провести для каждого из них.

В настоящее время топливо оценивается по трем позициям:

- энергетическая ценность  $Q_H^p$ , кДж/кг;
- финансовая стоимость (угля) Ц, руб/кг;
- экологическое качество  $\Sigma m_C$ , кг/кг.

Сравнивать эти различные по природе показатели сложно, тем более, что тут возможны

разногласия: топливо ценное, но дорогое, много выбросов; топливо богатое, цена удовлетворительная, много выбросов и др. Поэтому следует найти такой способ оценки ценности топлива, чтобы получать однородные показатели для оценки разных сторон качества топлива. Давно известен единый эквивалент разных товаров и показателей – это цена, стоимость. При использовании топлива в качестве основной учетной единицы нужно принять стоимость, те или иные затраты и эффекты, отнесенные к единице поставленной энергии. Это значит, что все затраты оценки должны иметь размерности руб/кДж.

**Выводы.** Концепция комплексной стоимостной оценки может быть использована для многих других случаев. При этом в качестве удельной единицы, по отношению к которой оценивается вклад того или иного фактора, может быть выбрана любая характеристика (параметр), который служит для оценки результатов работы агрегатов. По сути дела этот принцип лежит в основе калькуляции основной продукции. Все виды затрат (сырье, труд, транспорт и многое другое) приводятся к стоимостной форме. Рациональность и необходимость таких расчетов ни у кого не вызывает сомнения и так поступают всегда по отношению к продукции. В работе предлагается такой подход перенести на другие процессы и ситуации, как было показано при приобретении (покупке) топлива, где никогда оценка «себестоимости покупки» не проводилась. Другим таким же прогнозным планированием может быть ситуация с вторичным продуктом или энергией. При улавливании пыли промышленных газов приложение предлагаемой концепции позволит выбрать наиболее рациональный вариант. То, что в качестве основного примера в настоящей работе рассматривалось топливо, является далеко не случайным. Активная работа по противостоянию возможного изменения глобального климата выражается в постоянном участии заинтересованных сторон в решении этого вопроса. В ноябре 2016 г. в Марракеше состоялась 22 конференция сторон 22 КС (в русскоязычном варианте), или COP 22 (conference of parties), неформальный девиз которых звучал так: «Choice of Fuel» (выбор топлива), что отражает особо остро стоящий вопрос об использовании углеводородного топлива в будущем. Для Кузбасса это является сверхважным вопросом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. – Нью-Йорк. 9 мая 1992 г.
2. Интернет-сайт для консультации по практическому исследованию механизмов Киотского протокола. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: [www.carbonmarketsoptions.com](http://www.carbonmarketsoptions.com). (Дата обращения 23.01.17 г.).
3. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения. – М.: Теплоэнергетик, 2003. – 688 с.
4. Парижское соглашение об изменении климата, 15.12.2015 г. Париж. Интернет-сайт. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch). (Дата обращения 23.01.17 г.).
5. Семикин И.Д., Аверин С.Н. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. Учебное пособие для студентов металлургических специальностей вузов. – М.: Металлургия, 1965. –392 с.

© 2017 г. В.В. Стерлигов, Е.С. Татарина,  
И.В. Чикурова  
Поступила 2 марта 2017 г.

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 658.378.386.1.083.74

*О.В. Гринкевич, Ю.Е. Романенко*

Сибирский государственный индустриальный университет

### АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время в России актуальна проблема обеспечения производств высококвалифицированными кадрами. Для решения кадровой проблемы внедряется новая система квалификаций, неотъемлемой частью которой являются профессиональные стандарты. Задача системы квалификаций – обеспечить работодателей квалифицированным персоналом, снизить затраты на его адаптацию, обучить производственным технологиям и, как следствие, обеспечить стабильное качество выпускаемого продукта.

Главная идея заключается в том, чтобы «сблизить» производство и образование: став соразработчиками образовательных программ, работодатели получают реальную возможность участвовать в формировании и осуществлении государственной политики в этой области.

Согласно постановлению правительства РФ [1] профессиональные стандарты должны применяться работодателями при формировании кадровой политики: в управлении персоналом, при организации обучения и аттестации работников, разработке должностных инструкций, тарификации работ, присвоении тарифных разрядов работникам и установлении систем оплаты труда с учетом особенностей организации производства, труда и управления; в управлении образовательными организациями профессионального образования при разработке профессиональных образовательных программ; при разработке в установленном порядке федеральных государственных образовательных стандартов профессионального образования.

С 1 июля 2016 г. применение работодателями профессиональных стандартов стало обязательным в части требований к квалификации, необходимой работнику для выполнения трудовой функции, если Трудовым Кодексом РФ, другими федеральными законами или иными нормативными правовыми актами РФ установлены такие требования [2]. Это означает, что если требования к квалификации документально работником не подтверждены, ему

будет необходимо в ближайшее время пройти обучение по основным или дополнительным программам, иначе возможно его увольнение. Также надо понимать, что такая ситуация будет иметь одномоментный массовый характер в России в ближайшем будущем.

Профессиональный стандарт (ПС) – это характеристика квалификации, которая необходима работнику для выполнения определенного вида профессиональной деятельности [3].

В отличие от Единого квалификационного справочника должностей руководителей, специалистов и служащих и Единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих структура описания квалификационной характеристики в ПС предусматривает использование усовершенствованной конструкции в виде сочетаний требований к уровню знаний работника, его умениям, профессиональным навыкам, опыту работы и другим требованиям. Соответственно, ПС является сложным документом, состоящим из нескольких разделов, которые, в свою очередь, наполнены большим количеством информации [4].

На декабрь 2016 г. в области металлургического производства утверждены 57 профессиональных стандартов, 43 находятся в разработке.

Рассмотрим структуру и содержание профессиональных стандартов в области металлургического производства, а также проведем анализ содержащейся в них информации с точки зрения возможного трудоустройства выпускника высшего учебного заведения, получившего диплом бакалавра по направлению 22.03.20 Металлургия.

Это направление включает в себя четыре профиля подготовки: металлургия сварочного производства; металлургия цветных, редких и благородных металлов; обработка металлов давлением; металлургия черных металлов. Многообразие технологий производств и, соответственно, профессий, обеспечивающих работоспособность этих технологий, не дает возможности выполнить общий анализ профессиональных стандартов всей металлургии.



ческой отрасли даже в рамках одного направления подготовки бакалавров. В связи с этим в работе рассмотрены профессиональные стандарты, разработанные для профессий, которые отнесены к металлургии черных металлов.

Согласно приказа [5] Министерством труда утверждены девять уровней квалификаций. Уровни квалификаций применяются при разработке профессиональных стандартов для описания трудовых функций, требований к образованию и обучению работников и содержат описание следующих показателей: «Полномочия и ответственность», «Характер умений», «Характер знаний», «Основные пути достижения уровня квалификации». Уровни квалификации определяют требования к умениям, знаниям, уровню квалификации в зависимости от полномочий и ответственности работника. Образовательные программы бакалавриата отнесены к шестому квалификационному уровню, показатели которого приведены в табл. 1.

Таким образом, выпускники высших учебных заведений, получившие диплом бакалавра, могут трудоустроиться на должности, отнесенные к шестому квалификационному уровню. Следует отметить, что большинство выпускников ВУЗов не имеют опыта работы по специальности, что и будет учитываться при анализе профессиональных стандартов.

Как отмечалось ранее, профессиональный стандарт – комплексный документ, в котором помимо требований к образованию работника зафиксированы необходимые ему умения, профессиональные навыки и опыт работы. Проанализируем профессиональные стандарты в обла-

сти черной металлургии и возможное трудоустройство выпускника бакалавра на производство в условиях внедрения и функционирования ПС. В связи с тем, что Министерством труда не так много стандартов утверждено в области черной металлургии, рассмотрим профессиональный стандарт «Специалист по производству чугуна». Этот нормативный документ утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации № 928н от 1 декабря 2015 г. [6].

Наименование вида профессиональной деятельности (код 27.033) – Организация производства чугуна. Информация об обобщенных трудовых функциях и трудовых функциях работника в должностях и профессиях, предусмотренных в стандарте, приведена в табл. 2.

Рассмотрим подробно «Обобщенные трудовые функции» стандарта под кодом «А» [6]. Информацию сведем в табл. 3.

Выпускник бакалавр мог бы трудоустроиться на должности и профессии, прописанные в этом стандарте. Однако более глубокий анализ ПС и отсутствие опыта работы у выпускника отрицает такую возможность необходимо отработать не менее одного года в должности по подготовке шихты в доменном производстве (табл. 3). Опыт такой работы в доменном производстве можно получить в должности шихтовщика.

Требования к работнику по подготовке шихты, характеристики обобщенных трудовых функций рассмотрены в ПС «Шихтовщик» (табл. 4), утвержденном приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации № 946н от 2 декабря 2015 г. [7].

Т а б л и ц а 1

**Показатели шестого квалификационного уровня**

Полномочия и ответственность	Характер умений	Характер знаний
Самостоятельная деятельность, предполагающая определение задач собственной работы и/или подчиненных по достижению цели	Разработка, внедрение, контроль, оценка и корректировка направлений профессиональной деятельности, технологических или методических решений	Применение профессиональных знаний технологического или методического характера, в том числе, инновационных
Обеспечение взаимодействия сотрудников и смежных подразделений		Самостоятельный поиск, анализ и оценка профессиональной информации
Ответственность за результат выполнения работ на уровне подразделения или организации		

**Выдержки из профессионального стандарта «Специалист по производству чугуна»**

Код	Обобщенные трудовые функции	Уровень квалификации	Трудовые функции
А	Формирование технологических запасов шихтовых материалов для производства чугуна	6	Определение организационных и технических мер по формированию шихтовых материалов в доменном цехе
			Организация работы работников по обеспечению доменного цеха шихтовыми материалами
В	Организация выплавки чугуна в доменных печах	6	Определение организационных и технических мер по выплавке чугуна в доменных печах
			Организация работы работников по выплавке чугуна
С	Организация переработки продуктов доменной плавки	6	Определение организационных и технических мер по переработке продуктов доменной плавки
			Организация работы работников участков по переработке продуктов доменной плавки
D	Координация деятельности подразделений доменного цеха	6	Определение организационных и технических мер по обеспечению выплавки чугуна и переработки продуктов плавки в доменном цехе
			Организация работы подразделений доменного цеха по выполнению сменного задания выплавки чугуна и переработки продуктов плавки

Исходя из приведенной информации, человек, не имеющий опыта работы, может быть трудоустроен только на должность шихтовщика 2 разряда. Обратим внимание на требования к образованию и обучению в этой должности: «профессиональное обучение – программы профессиональной подготовки по профессиям рабочих, программы переподготовки рабочих, программы повышения квалификации рабочих». Таким образом, выпускник ВУЗа, имеющий только диплом бакалавра, без опыта работы, и не обучаясь по дополнительным программам профессионального образования, не может быть принят даже на должность шихтовщика 2 разряда, так как он не удовлетворяет требованиям к образованию.

С одной стороны логика разработчиков профессиональных стандартов понятна: чтобы стать мастером участка, старшим мастером или начальником смены следует отработать на менее ответственных рабочих местах, например шихтовщиком. Отработать навыки работы, перенять опыт и умения, понять принцип технологической цепочки производства, начиная с нижней ступени карьерной лестницы.

С другой стороны, в этой ситуации возникает замкнутый круг для большинства бакалавров, потому что многие из них после среднего общего образования получают сразу высшее, минуя среднее профессиональное, и не изучают дополнительно программы профессиональной подготовки по профессиям рабочих.

**Обобщенные трудовые функции стандарта «Специалист по производству чугуна» (код А)**

Показатель	Описание
Возможные наименования должностей, профессий	Мастер Старший мастер
Требования к образованию и обучению	Высшее образование – бакалавриат
Требования к опыту практической работы	Не менее одного года работы по подготовке шихты в доменном производстве
Особые условия допуска к работе	Лица не моложе 18 лет Прохождение стажировки, обучения и инструктажа по охране труда, промышленной и пожарной безопасности; проверка знаний требований охраны труда, промышленной и пожарной безопасности

**Требования к работнику в должности по подготовке шихты**

Обобщенная трудовая функция	Ведение технологических процессов приготовления шихты
Возможные наименования должностей, профессий	Шихтовщик 3-го разряда Шихтовщик 4-го разряда
Требования к образованию и обучению	Профессиональное обучение – программы профессиональной подготовки по профессиям рабочих, программы переподготовки рабочих, программы повышения квалификации рабочих
Требования к опыту практической работы	Не менее шести месяцев работы шихтовщиком 2-го разряда
Особые условия допуска к работе	Лица не моложе 18 лет Прохождение обучения и инструктажа по охране труда, промышленной и пожарной безопасности, стажировки и проверки знаний требований охраны труда, промышленной и пожарной безопасности Прохождение обязательных предварительных (при поступлении на работу) и периодических медицинских осмотров (обследований), а также внеочередных медицинских осмотров (обследований) в порядке, установленном законодательством Российской Федерации Наличие удостоверений: – стропальщика и на право работы с грузоподъемными сооружениями; – о допуске к работе с электроустановками напряжением до 1000 В
Обобщенная трудовая функция	Выполнение подготовительных работ к шихтоподготовке
Возможные наименования должностей, профессий	Шихтовщик 2-го разряда
Требования к образованию и обучению	Профессиональное обучение – программы профессиональной подготовки по профессиям рабочих, программы переподготовки рабочих, программы повышения квалификации рабочих
Требования к опыту практической работы	–
Особые условия допуска к работе	Лица не моложе 18 лет Прохождение обучения и инструктажа по охране труда, промышленной и пожарной безопасности, стажировки и проверки знаний требований охраны труда, промышленной и пожарной безопасности Прохождение обязательных предварительных (при поступлении на работу) и периодических медицинских осмотров (обследований), а также внеочередных медицинских осмотров (обследований) в порядке, установленном законодательством Российской Федерации Наличие удостоверений: – стропальщика и на право работы с грузоподъемными сооружениями; – о допуске к работе с электроустановками напряжением до 1000 В

По результатам детального анализа вышеупомянутых профессиональных стандартов можно сделать следующий вывод: соискатели, имеющие только высшее образование при отсутствии опыта работы, не могут быть трудоустроены в принципе.

Сложившаяся ситуация оказывает негативное влияние на обе стороны трудовых отношений: и на соискателей выпускников-бакалавров, и на потенциальных работодателей. Для первых – это проблема трудоустройства, для вторых – дефицит квалифицированных кадров в будущем.

Существующая система подготовки инженерных кадров не позволяет решить эту проблему. Нужен новый, адекватный требованиям времени подход к организации учебного процесса в высших учебных заведениях с привлечением предприятий-партнеров, в том числе и по направлению подготовки «Металлургия». Первый шаг для преодоления противоречий между ВУЗом и предприятиями сделан в институте металлургии и материаловедения Сибирского государственного индустриального университета в рамках работы кафедры «Обработки металлов давлением и материаловедения».

ЕВРАЗ ЗСМК», в названии которой отобразена заинтересованность предприятия-работодателя в высококвалифицированных кадрах.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 22.01.2013 г. № 23 (ред. от 23.09.2014 г. «О правилах разработки, утверждения и применения профессиональных стандартов»). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/70304190/> (Дата обращения 29.01.2017 г.).
2. Федеральный закон от 02.05.2015 г. № 122-ФЗ «О внесении изменений в Трудовой Кодекс Российской Федерации и статьи 11 и 73 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_178864/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_178864/) (Дата обращения: 29.01.2017 г.).
3. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 г. №197-ФЗ (ред. от 31.12.2014 г.). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/12125268/> (Дата обращения 29.01.2017 г.).
4. Крылов А.Н., Кустов Т.В. Профессиональные стандарты. Особенности при работе с профессиональными стандартами // Плани-

рование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона. 2015. № 1. С. 178 – 184.

5. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 12 апреля 2013 г. № 148н «Об утверждении уровней квалификации в целях разработки проектов профессиональных стандартов». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_146970/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146970/) (Дата обращения 29.01.2017 г.).
6. Профессиональный стандарт «Специалист по производству чугуна», утвержден Приказом Минтруда России от 31.12.2015 г. № 928н. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/law/review/2772577.html> (Дата обращения 29.01.2017 г.).
7. Профессиональный стандарт «Шихтовщик», утвержден Приказом Минтруда России от 02.12.2015 г. № 946н. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_192654/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_192654/) (Дата обращения 29.01.2017 г.).

© 2017 г. О.В. Гринкевич,  
Ю.Е. Романенко

Поступила 01 февраля 2017 г.

УДК 37/331.44:330.3

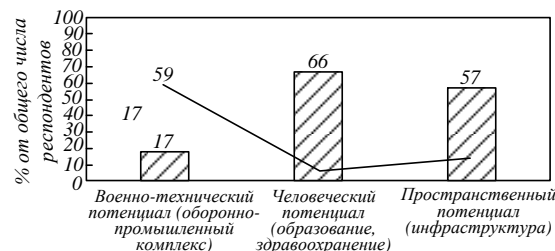
*Г.Г. Казанцева*

Сибирский государственный индустриальный университет

## О НЕОБХОДИМОСТИ И ОСОБЕННОСТЯХ РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА ПРИ ИННОВАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ РОССИИ

В научных источниках и средствах массовой информации актуальной темой последних нескольких лет является мировой финансово-экономический кризис, в том числе в экономике Российской Федерации, и пути выхода из него. Решение этой проблемы 66 % членов экспертного совета при Правительстве РФ видят в развитии человеческого потенциала (см. рисунок) [1].

Председатель Федерации независимых профсоюзов России М. Шмаков в своем докладе на Гайдаровском форуме 2017 также поднял вопрос, связанный с постоянной деградацией трудовых ресурсов вследствие



▨ – Высокий приоритет увеличения бюджетных средств на поддержку и развитие;  
— – Увеличение бюджетных расходов на поддержку и развитие

Результаты исследования Института национальных проектов, 2015 г.

снижения доходов населения, и необходимости развития человеческого капитала [2].

В развитых странах мира в конце 1990-х годов в человеческий капитал вкладывалось около 70 % всех средств, а в физический капитал – только около 30 % (см. таблицу). Причем, основную долю инвестиций в человеческий капитал в передовых странах мира осуществляет государство. И именно в этом состоит одна из его важнейших функций в части государственного регулирования экономики [3].

Разные мнения ученых в решении задачи развития человеческого капитала определены сложностью понимания данного термина. На научном семинаре Высшей школы экономики «Человеческий капитал как междисциплинарная область исследований» Ю. Корчагин представил разные определения термина и выделил базовыми составляющими человеческого капитала ментальность народа (традиции и культура населения, в том числе отношение к труду, семье, законопослушность, на которые определяющим образом исторически влияли религия, степень экономической свободы и условия жизни), качество образования, здоровье, накопленные знания (уровень развития науки и конкурентоспособность накопленных знаний), конкуренция и экономическая свобода, а также верховенство законов, безопасность бизнеса и граждан [3].

Развитие человеческого капитала тесно связано с получением новых знаний, изучения новых методов работы, техники, языков, перестройкой образа жизни и т.д. В связи с появлением необходимости освоения обществом большого количества изменений ученые в 2016 г. по заказу РВК [4] провели исследование социокультурных факторов инновационного развития. Результаты показали, что 48 % опрошенного населения верят, что научно-технические достижения определяют успех развития страны. Однако на практике люди с опаской воспринимают новое, особенно когда это касается изменения их образа жизни и профессиональной сферы. Зачастую негативная реакция населения к новшествам в их жизни связана с неуверенностью в своих силах [5]. Каждому человеку важно понимать свои сильные стороны, которые и будут являться бази-

сом, создающим ощущение стабильности при любых изменениях в жизни и помогающим решать новые задачи в постоянно меняющихся условиях функционирования компаний, рынков, страны и мира. Знать сильные стороны населения страны важно и для правительства при составлении стратегических планов развития государства.

Определение сильных сторон во многом зависит от природных способностей каждого человека. Существуют различные методики их выявления из разных областей знаний: биологии, медицины, психологии, социологии и т.д. Самой надежной, по мнению профессора, д.б.н. С.В. Савельева, является изучение областей мозга и степени их развитости с помощью томографа с более высоким разрешением, чем имеющийся для медицинской диагностики мозга [6]. С его помощью можно узнать развитость различных зон мозга и определить способности человека к определенным видам деятельности: культуре и искусству, техническим наукам, исследовательской деятельности и т.д. Наличие способностей в одной и той же области у разных людей может серьезно отличаться. У кого-то области мозга позволяют решать задачи на уровне инженера производственного предприятия, а у кого-то на уровне академика РАН. Знания потенциала мозговой деятельности позволят выстроить каждому человеку четкую траекторию развития профессиональной деятельности и подбора программ обучения и инвестирования в них, а работодателю упростить систему найма подходящих сотрудников.

Исследование мозга позволит, с одной стороны, определить явных лидеров в разных сферах деятельности, а с другой стороны, и людей со слабым интеллектуально-эмоциональным потенциалом, разделив тем самым общество на классы. Однако новые классы могут создать революционное положение в стране и не выгодны для текущей классовой элиты. Таким образом, томографические исследования особенности работы мозга не имеют перспектив развития в ближайшее время, хотя технически уже решены. Поэтому уче-

### Изменение структуры совокупного капитала в странах Запада и Японии

Год	1800	1860	1913	1950	1973	1997/98	Начало 21 века
Физический капитал, %	78 – 80	77 – 79	67 – 69	52 – 53	43 – 44	31 – 33	20

Человеческий капитал, %	20 – 22	21 – 23	31 – 33	47 – 48	56 – 57	67 – 69	80
-------------------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----

ные и практики продолжают разрабатывать и совершенствовать другие методы оценки и развития человеческого капитала, исходя каждый из своих установок, целей и областей знаний.

Необходимость выявления сильных сторон населения ставит следующие задачи перед научным сообществом.

*Оценка социально-культурной составляющей общества.* Центр независимых социологических исследований г. Санкт-Петербурга составил портрет культурно-ценностных, поведенческих характеристик работающих в инновационном секторе зарубежом, где были выявлены их следующие особенности: работники настроены на самореализацию, творчество, но не способны на долгосрочное планирование и работают в состоянии аврала, плохо сотрудничают с коллективом.

*Определение конкурентоспособных видов деятельности с учетом интеллектуально-эмоциональной специфики российского населения.* Исследования института национальных проектов определили профессиональные сферы конкурентного преимущества выходцев из России. Лидерами среди профессий стали: математики, IT специалисты, физики, химики, деятели в сферах науки о живой природе, медицине, искусстве, спорте и медиа [1]. Данные факты подаются как важные отличительные особенности в способностях и социально-культурном уровне развития населения России. Более того, есть и другие исследования, оценивающие особенности человеческого капитала в зависимости от региона проживания в нашей стране. По словам А. Аузана: «Пестрота страны – это ее шанс». Необходимо максимально эффективно использовать то, что у нас есть от природы. Важно найти регионы и города, где можно запускать инновационные проекты, которые в целом в стране не работают [1].

Существуют сложности для развития человеческого капитала в России:

– смещение расходов государственного бюджета в направлении военно-технического потенциала и недостаточное финансирование науки, образования, здравоохранения и инфраструктуры в стране [1,7];

– низкий уровень межличностного и институционального доверия в социуме («бриджинговый» капитал); на самом низком уровне – доверие населения друг к другу, когда люди больше думают о выживании, а не о развитии; аргументы о важности доверия в социуме приводит и В. Вахштайн, декан факультета соци-

альных наук Московской высшей школы социальных и экономических наук [3];

– низкий уровень социально-экономической поддержки населения, высокий уровень разрыва в доходах, большая доля бедного населения – все это отметила в своем докладе на мультимедийном круглом столе на тему "Зарплата, МРОТ, прожиточный минимум: как они связаны с экономическими реалиями?" заместитель председателя Федерации Независимых Профсоюзов России (ФНПР) Н. Кузьмина [8]; возможность развития общества, государства за счет равномерного распределения доходов в обществе предлагает Председатель ФНПР М. Шмаков [2];

– сложность бюрократической системы и институциональных барьеров в развитии и продвижении инновационных проектов, в том числе через фонды и институты развития; показательным примером в подтверждении этого факта является высказывание А. Комиссарова, директора Фонда развития промышленности, сравнившего безуспешность заимствования и внедрения зарубежных инновационных практик в нашей стране с образом верблюда, который был на самом деле арабским скакуном, но прошел через все стадии бюрократических согласований.

*Разработка и внедрение социально-гуманитарных программ поддержки и развития населения для положительного восприятия инноваций в жизни и деятельности.* Для этих целей в развитых странах выделяются две третьих от объема инвестиций в техническую разработку и внедрение инновационного продукта для использования обществом (например роботы, заменяющие трудовые функции человека), меняющего привычный уклад жизни и деятельности человека. Это отражает важность разработок социально-гуманитарных программ при инновационном пути развития государства [9].

Результатами развития человеческого капитала являются:

– изменение поведенческих установок за счет переоценки ценностей: от ценностей выживания к самовыражению и от традиционных к секулярно-рациональным ценностям; важно развить в обществе долгосрочную ориентацию, терпимость, сокращение дистанции по отношению к власти, коллективизм, маскулинность; изменение отношения к таким ценностям возможно за счет социально-культурных программ, для разработки которых А. Аузан в апреле 2016 г. выступил на за-



седании Совета Федерации с предложением включить новое междисциплинарное научное направление «Социально-культурная экономика», которое активно развивается научной школой при МГУ [1];

– более универсальное и непрерывное обучение, в том числе по «запросу» обучающегося, которое должно продолжаться в возрасте и после 40 лет как в развитых странах – считает ректор Высшей школы экономики Я. Кузьминов [9]: во-первых, это связано с быстрыми темпами изменений в науке и технике, а во-вторых, является следствием увеличивающейся продолжительности жизни населения в ближайшее десятилетие;

– открытость к новому и массовое творчество (до 30 % населения российских городов) – также является мнением Я. Кузьмина;

– гибкость в профессиональной реализации: «по специальности работают неуспешные люди» утверждает В. Мау, ректор Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ [10];

– развитие эмоционального интеллекта с целью развития способности понимать других людей и организовывать эффективные коммуникации, в том числе при работе в командах [11];

– повышение значения показателя личной свободы, то есть наличие свободного времени в жизни человека [1].

**Выводы.** Таким образом, многие ученые и деятели, профессиональная область которых связана со стратегиями развития государства, инновациями и инновационными путями развития экономики России, отказываются от активного скачкообразного экономического роста, зависящего от рыночной конъюнктуры на сырьевых рынках, а поддерживают медленный и стабильный рост экономики за счет развития человеческого капитала и реализации интеллектуальных результатов его деятельности. Важнейшими факторами улучшения жизни человека они видят: в выявлении и реализации его сильных сторон; в программах социально-культурного развития посредством изменения ценностных установок человека; в повышении доходов населения; воспитании новых членов гражданского общества; в развитии экспорта высокотехнологичной продукции, главным образом, за счет увеличения инвестиций в науку и образование, здравоохранение; в бюрократическом упрощении функционирования институциональной среды государства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Выступление декана экономического факультета МГУ А. Аузан в рамках «Времени эксперта» на заседании Совета Федерации : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.council.gov.ru/events/streams/tv/> (Дата обращения 01.03.2017).
2. Гайдаровский форум 2017. Секция «Социальное развитие: исторические уроки и грядущие вызовы» : [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gaidarforum.ru/program/media/sotsialnoe-razvitie-istoricheskie-uroki-i-gryadushchie-vyzovy/#lg=1&slide=0> (Дата обращения 01.03.2017).
3. Юрий Корчагин «Человеческий капитал – интенсивный социально-экономический фактор развития личности, экономики, общества и государственности»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hse.ru/data/2011/04/29/1210692190/Doklad.doc> (Дата обращения 01.03.2017).
4. РВК и клуб «Валдай» дискуссионная площадка для обсуждения вызовов будущего : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.rvc.ru/press-service/news/company/99903/> (Дата обращения 01.03.2017).
5. Эйкен Д.В. Точка отчета. Система, помогающая начать новый проект, новую карьеру и новую жизнь (аудиокнига). – М.: Изд-во Альпина Бизнес Букс, 2010.
6. Разведопрос: Сергей Савельев про особенности работы мозга : [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=dOWsSYqxM58&feature=youtu.be> (Дата обращения 01.03.2017).
7. Разведопрос: Юрий Болдырев о фундаментальной науке и реформе РАН : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.youtube.com/watch?v=PG\\_DFTW2xSQ](https://www.youtube.com/watch?v=PG_DFTW2xSQ) (Дата обращения 01.03.2017).
8. Зарплата, МРОТ, прожиточный минимум: как они связаны с экономическими реалиями? : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://ria.ru/press\\_video/20110929/446620953.html#ixzz3mQuwjgfp](https://ria.ru/press_video/20110929/446620953.html#ixzz3mQuwjgfp) (Дата обращения 01.03.2017).
9. Гайдаровский форум 2017. Секция «Технологические сдвиги и экономическая динамика: что происходит на самом деле? Часть 1» : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gaidarforum.ru/program/media/tekhnologicheskie-sdvigi-i-ekonomicheskaya-dinamika-chto-proiskhodit-na-samom-dele-chast-1/#lg=1&slide=0> (Дата обращения 01.03.2017).

10. Гайдаровский форум 2017. Секция «Университеты 3.0: будущее рядом?»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gaidarforum.ru/program/media/university-3-0-budushchee-ryadom/#lg=1&slide=0> (Дата обращения 01.03.2017).
11. Гайдаровский форум 2017. Секция «Бизнес-образование: роль эмоционального интеллекта и адаптивности к изменениям» :

[Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gaidarforum.ru/program/media/biznes-obrazovanie-rol-emotsionalnogo-intellekta-i-adaptivnosti-k-izmeneniyam/> (Дата обращения 01.03.2017).

© 2017 г. Г.Г. Казанцева  
Поступила 10 марта 2017 г.

## РЕФЕРАТЫ

### УДК 625.143.48

Статистическая модель управления процессами контактной сварки рельсов / Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Патрушев А.О., Шишкин П.Е. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 4.

Рассмотрена технология сварки железнодорожных рельсов электроконтактным методом с применением пульсирующего оплавления на машинах К1100 и производственные испытания образцов на статический поперечный изгиб. Проведен многофакторный корреляционный анализ технологических параметров процесса электроконтактной сварки рельсов. На основании имеющихся данных создана математическая модель процесса контактной сварки рельсов. Разработанная математическая модель позволяет оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварки. Предлагается с помощью регрессионных моделей управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов и прогнозировать качество сварного шва. Ил. 1. Библ. 12.

**Ключевые слова:** бесстыковой путь, технология сварки рельсов, этапы сварки, параметры процесса сварки, контактностыковая сварка рельсов, оплавление, режимы сварки, контрольный образец, коэффициенты регрессии, регрессионные модели.

Statistical model of process control of rail contact welding / Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Patrushev A.O., Shishkin P.E. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – С. 4.

The technology of rails welding by the electrocontact method with the use of pulsating fusion on machines K1100 and production tests of samples for static transverse bending are presented. A multifactorial correlation analysis of technological parameters of the rail electrocontact welding was carried out. Based on the available data, the mathematical model of the process of rail contact welding was developed. The developed mathematical model allows the influence of technological process parameters of rail contact welding on the quality of welding to be estimated. It is proposed with the help of regression models to control the technological parameters of the rail contact welding process and to predict the quality of the welded seam. Fig. 1. Ref. 12.

**Keywords:** continuous welded rail, rails welding technology, stages of welding, welding process parameters, contact butt welding of rails, fusion, welding modes, control sample, regression coefficients, regression models.

### УДК 621.78.011:669.14

Природа формирования наноразмерных фаз при термомеханическом упрочнении стали / Кондратова О.А., Громов В.Е., Мартусевич Е.В., Костерев В.Б., Иванов Ю.Ф. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 8.

Установлено, что явление повышения прочности поверхностных слоев двутавровой балки из низкоуглеродистой стали 09Г2С при термомеханической обработке и последующем ускоренном охлаждении водой является многофакторным, морфологически многокомпонентным. Проанализированы процессы, приводящие к формированию в структуре стали наноразмерных фаз. Библ. 23.

**Ключевые слова:** упрочнение, наноразмерная фаза, цементит, термомеханическая обработка.

The nature of the formation of nano-sized phases during thermo-mechanical hardening of steel / Kondratova O.A., Gromov V.E., Martusevich E.V., Kosterev V.B., Ivanov Yu.F. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 8.

It is established that the phenomenon of surface layers hardening of the double T-beam produced from low carbon steel (0.1 % C, 2 % Mn, 1 % Si) under thermo-mechanical treatment and the following water cooling is multiple-factor and morphologically multicomponent. The processes leading to the formation of nano-sized phases in the steel structure are analyzed. Ref. 23.

**Keywords:** strengthening, nano-sized phase, cementite, thermo-mechanical treatment.

**УДК 625.143.48**

Оптимизация технологических параметров процесса контактной стыковой сварки рельсов / Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Башченко Л.П., Князев С.В. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 12.

Дано описание технологии сварки железнодорожных рельсов. Используется электроконтактный метод с применением пульсирующего оплавления на машинах K1100. Проведены производственные испытания образцов на статический поперечный изгиб. Рассмотрены принципы управления процессом контактной стыковой сваркой рельсов. Показаны возможные причины снижения качества сварного стыка рельсов. На основании разработанных математических моделей процесса контактной сварки рельсов определены оптимальные режимы сварки, позволяющие повысить качество сварного рельсового стыка. Ил. 1. Библ. 8.

**Ключевые слова:** железнодорожные рельсы, контактная стыковая сварка, оптимальные режимы, качество, технологические параметры.

Optimization of technological process parameters of rail contact butt welding / Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Bashchenko L.P., Knyazev S.V. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 12.

The description of the rail welding technology by electrocontact method using pulsed fusion on K1100 machines and production test samples for static transversal bending is provided. The principles of process control of contact butt welding of rails are considered. The possible reasons for the decrease in the quality of welded rail joint are shown. On the basis of the developed mathematical models of rail contact welding process, the optimal welding modes have been determined, which make it possible to improve the quality of the welded rail joint. Fig. 1. Ref. 8.

**Keywords:** rails, contact butt welding, the optimal modes, quality, process parameters.

**УДК 620.197**

Corrosion behavior overview and analysis of clam steel vs. weldments in liquid lithium lead at 753K / Hongyan Cao, Xizhang Chen, Sergey Konovalov // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 16.

CLAM steel and its weldments' corrosion behavior in flowing lithium lead alloy at 753K are overviewed and analyzed. Surface morphology, compositional variation, corrosion rate have been discussed. It is essential to investigate microstructure transformation and corrosion resistance change during exposure period, obvious composition change is observed on corrosion surface and there existed a single layer of Fe-Cr compound. Weight loss exhibits a linear increase more than 2500h and weldments corrosion depth is larger than that of base metal. Passivation layers have played a crucial protection role in the corrosion stage, the elements slowly dissolving into liquid lithium lead explains the main corrosion mechanism.

**Keywords:** CLAM steel, Weldments, Corrosion behavior, Liquid lithium lead.

Corrosion behavior overview and analysis of clam steel vs. weldments in liquid lithium lead at 753K / Hongyan Cao, Xizhang Chen, Sergey Konovalov // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 16.

CLAM steel and its weldments' corrosion behavior in flowing lithium lead alloy at 753K are overviewed and analyzed. Surface morphology, compositional variation, corrosion rate have been discussed. It is essential to investigate microstructure transformation and corrosion resistance change during exposure period, obvious composition change is observed on corrosion surface and there existed a single layer of Fe-Cr compound. Weight loss exhibits a linear increase more than 2500h and weldments corrosion depth is larger than that of base metal. Passivation layers have played a crucial protection role in the corrosion stage, the elements slowly dissolving into liquid lithium lead explains the main corrosion mechanism.

**Keywords:** CLAM steel, Weldments, Corrosion behavior, Liquid lithium lead.

**УДК 504.062.2/47:669**

Термодинамическое моделирование процессов восстановления железа при термохимическом окислении конвертерных шламов / Кузнецов С.Н., Рыбенко И.А., Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Фейлер С.В. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 25.

С использованием программного комплекса «Терра» проведено термодинамическое моделирование восстановления железа при производстве феррококса с применением адсорбционного обезвоживания и термохимического окускования конвертерных шламов. Установлено, что при использовании в качестве восстановителей концентратов ЦОФ «Кузнецкая» (состоящего из 50 % газового жирного (ГЖ) и 50 % жирного (Ж) угля) и угля марки Ж Межэгейского месторождения полное восстановление железа происходит при их расходе 20 кг/100 кг шлама. Для получения железокоса с регламентированным содержанием углерода получены расчетные соотношения. Установлено, что для полного восстановления железа термохимическое окускование шлама в смеси со спекающимися углями необходимо проводить при температурах не ниже 900 °С. Табл. 1. Ил. 2. Библ. 7.

**Ключевые слова:** восстановление железа, конвертерные шламы, окускование, термодинамическое моделирование.

Thermodynamic modeling of iron reduction processes during thermo-chemical agglomeration of converter sludge / Kuznetsov S.N., Rybenko I.A., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Feiler S.V. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 25.

With the use of software “Terra” the thermodynamic modeling of iron reduction in the production of ferrocoke using adsorption dehydration and thermo-chemical agglomeration of converter sludge is performed. It was established that when using concentrates of the processing plant “Kuznetskaya” (consisting of coal brands: gas fat coal (GZh) 50% and fat coal (Zh) 50%) and coal of Zh grade from the Mezhegeyskoye deposit as reducing agents, the complete reduction of iron occurs with their consumption 20 Kg/100 kg of sludge. To produce ferrocoke with the required content of carbon the calculated ratios were obtained. It was established that for the complete reduction of iron, the thermo-chemical sludge agglomeration in the mixture with caking coals must be carried out at temperatures not lower than 900 °C. Table. 1. Fig. 2. Ref. 7.

**Keywords:** iron reduction, converter sludges, agglomeration, thermodynamic modeling.

#### УДК 551.3.051.5

Несогласия и перерывы: современное состояние международной терминологии и возможности ее использования российскими специалистами / Гутак Я.М., Рубан Д.А. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 29.

Представления о «несогласиях» и связанных с ними «перерывах» имеют ключевое значение при расшифровке строения осадочных толщ. Однако для соответствующей международной терминологии характерна множественность. Используются такие термины, как unconformity (в том числе angular unconformity), disconformity, discontinuity, diastem, hiatus, sedimentary (sedimentation) break, stratigraphic gap и non-deposition. Анализ их использования зарубежными геологами позволяет проследить некоторые коннотационные особенности. Выявлена очевидная неоднозначность существующей терминологии, ее перенос в отечественную практику нецелесообразен. При подготовке российскими специалистами статей для международных журналов термины лучше использовать интуитивно, что показано на ряде примеров (Юг России, Южная Сибирь). Ил. 1. Библ. 11.

**Ключевые слова:** геологическая терминология, несогласное залегание, осадконакопление, перерыв, стратиграфия.

Unconformities and hiatuses: current state of international terminology and possibilities of its use by Russian specialists Gutak J.M., Ruban D.A. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 29.

The idea of unconformities and related hiatuses are of crucial importance for deciphering of architecture of sedimentary complexes. However the relevant international terminology is multiple. The used terms are "unconformity" (including "angular unconformity"), "disconformity", "discontinuity", "diastem", "hiatus", "sedimentary (sedimentation) break", "stratigraphic gap" and "non-deposition". The analysis of their application by the foreign geologists permits to trace some connotation peculiarities. The evident uncertainty of the existing terminology is established. Transfer of this terminology to the domestic practice should be avoided. The preparation of articles for international journals by the Russian specialists requires intuitive use of the terms, which is demonstrated by several examples from the Russian South and Southern Siberia. Fig. 1. Ref. 11.

**Keywords:** geological terminology, unconformity, sedimentation, hiatus, stratigraphy.

**УДК 622.817.49:519.62:512.644**

Разработка алгоритма расчета метанообильности очистного забоя с учетом геомеханических процессов в углепородном массиве / Поздеев И.А. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 32.

Проведен анализ производственного опыта и действующих нормативных документов. Обозначена актуальная научно-практическая задача прогноза метанообильности очистного забоя с учетом изменения фильтрационных свойств геомассива под влиянием геомеханических процессов и предложен вариант ее решения. Решение задачи состоит в синтезе нескольких методических подходов и результатов численного моделирования, который обеспечит вычисление дебита метана, выделившегося с поверхности очистного забоя, с использованием переменных значений деформаций и пористости массива. Ил. 3. Библ. 15.

**Ключевые слова:** очистной забой, метанообильность, численное моделирование, фильтрационные свойства углепородного массива, деформации, давление газа, зона фильтрации, шахтный эксперимент.

Algorithm development for calculation of methane profusion of the clearing face taking into account the geomechanical processes in the coal-rock mass / Pozdeev I.A. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 32.

The analysis of production experience and valid regulations is performed. The actual scientific and practical task of prediction of methane profusion of clearing face considering changes in the filtration properties of rock mass influenced by geomechanical processes is described and its alternative solution is proposed. The solution consists in the synthesis of several methodological approaches and the numerical simulation results, which will provide the calculation of the methane production rate, released from the surface of the clearing face, using variables value porosity and deformation of rock mass. Fig. 3. Ref. 15.

**Keywords:** clearing face, methane profusion, numerical modeling, filtration properties of coal-rock mass, deformation, gas pressure, filtration area, mine experiment.

**УДК 622.831**

Обоснование по результатам численного моделирования параметров крепи сбоек капитальных выработок, пройденных в неоднородном углепородном массиве / Исаченко А.А., Петров А.А. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 39.

Дано краткое обоснование необходимости расчета крепи выработок, пройденных между выработками соседних угольных весьма сближенных пластов с выделением участков с однородными горно-геологическими параметрами горных пород. Методом математического моделирования установлены формы и размеры зон запредельного состояния пород. Разработаны рекомендации по креплению на различных участках выработок. Ил. 5. Библ. 8.

**Ключевые слова:** углепородный массив, горные выработки, математическое моделирование, параметры крепи.

Justification based on the numerical simulation results of the lining parameters of holing-throughs in the inhomogeneous coal-bearing massif / Isachenko A.A., Petrov A.A. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 39.

This brief substantiation of the need of calculating workings lining, passed between the neighboring coal contiguous seams allocating the areas with a homogeneous geological and mining parameters of rocks. By the method of mathematical modeling the authors determine the form and size of the zones transcendent status of the rocks and the recommendations for support on different parts of the workings. Fig. 5. Ref. 8.

**Keywords:** coal and rock massif, mining workings, mathematical modeling, lining parameters.

**УДК 622.822.2**

Выбор и обоснование алгоритма моделирования работы длинного очистного забоя с учетом влияния неравномерности метановыделения / Домрачев А.Н., Риб С.В., Никитина А.М. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 43.

Рассмотрены результаты оценки влияния газовой выделение на показатели работы длинного комплексно-механизированного очистного забоя с использованием методов имитационного моделирования. Выпол-

нено моделирование нагрузки на очистной забой и коэффициента машинного времени при трех различных параметрах розыгрыша коэффициента неравномерности газовыделения как случайной величины. Дисперсионный анализ полученных результатов показал значимость влияния неравномерности метановыделения на результаты моделирования при использовании алгоритма пересчета скорости подачи комбайна по условию необходимости поддержания допустимой концентрации метана на исходящей струе очистного участка. Ил. 1. Библ. 7.

**Ключевые слова:** алгоритм, нагрузка на очистной забой, генераторы случайных чисел, простой очистного забоя, коэффициент машинного времени, неравномерность метановыделения, имитационное моделирование.

Selection and justification of the algorithm for modeling the work of a longwall, taking into account the influence of uneven methane evolution / Domrachev A.N., Rib S.V., Nikitina A.M. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 43.

This article examines the results of the assessment of the effect of gas evolution on the performance of a long complex mechanized bottomhole with the use of simulation methods. The modeling of the load on the sewage face and the coefficient of machine time for three different parameters for drawing the coefficient of unevenness of gas evolution as a random variable is performed. The dispersion analysis of the obtained results showed the significance of the influence of the unevenness of methane evolution on the simulation results using the algorithm for converting the feed rate of the combine by the condition of the need to maintain an allowable methane concentration on the outflowing stream of the treatment site. Fig. 1. Ref. 7.

**Keywords:** algorithm, longwall productivity, random number generators, longwall productivity breaking, machinery time ratio, uneven methane release, simulation modeling.

#### УДК 621.967.1:621.77

Анализ работы ножниц для резки металла / Стерлигова Я.М., Демина Е.И. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 46.

Рассмотрены факторы, которые можно использовать для снижения усилий резания, расхода энергии и обеспечения точности резания с целью экономии металла. Ил. 2. Библ. 7.

**Ключевые слова:** резание, ножницы, усилие резания, ресурс- и энергосбережение.

Analysis of the metal shears operation / Sterligova Ya.M., Demina E.I. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 46.

The different factors, which can be used in order to save material and energy as well as to increase the accuracy of metal cutting, have been considered. Fig. 2. Ref. 7.

**Keywords:** cutting, shears, cutting force, resource and energy saving.

#### УДК 620. 193

Влияние щелочноземельных металлов на анодное поведение свинца в нейтральной среде / Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Ниезов О.Х., Эшов Б.Б., Ходжаев Ф.К. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 49.

Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение сплавов свинца со щелочноземельными металлами. Показано, что стационарный потенциал сплавов систем Pb – Ca (Sr, Ba) с ростом концентрации щелочноземельного металла (ЩЗМ) смещается в положительном направлении оси ординат, а в присутствии хлорид-ионов стационарный потенциал чистого свинца изменяется в отрицательном направлении в среде 3 %-го NaCl. Величины потенциалов питтингообразования и репассивации чистого свинца и его сплавов с ЩЗМ по мере роста концентрации хлорид-ионов в электролите смещаются в более отрицательную область. Увеличение концентрации легирующего компонента в свинце способствует росту этих потенциалов во всех средах независимо от концентрации хлоридионов. Плотность тока коррозии и, соответственно, скорость коррозии сплавов систем Pb – Ca (Sr, Ba) с ростом концентрации хлорид-ионов увеличивается. Такая зависимость характерна для всех сплавов независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств легирующего компонента. Ил. 2. Библ. 15.



**Ключевые слова:** свинец, щелочноземельные металлы, потенциостатический метод, электрохимическая коррозия, анодное поведение, потенциал коррозии, скорость коррозии.

The effect of alkaline earth metals on the anodic behavior of lead in a neutral medium / Ganiev I.N., Mulloeva N.M., Niyozov O.H., Eshov B.B., Khojaev F.K. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 49.

By the potentiostatic method in potentiodynamic mode at the scanning potential rate of 2 mV/s the anodic behavior of lead alloys with alkaline earth metals is investigated. It is shown that the stationary potential, alloy systems Pb-Ca (Sr, Ba) with increasing concentration of the alkaline earth metal is displaced in the positive region, and a concentration of chloride-ion pure lead stationary potential in the negative region shifts in the medium 3 % NaCl. Pitting potentials and repassivation pure lead and its alloys with alkaline-earth metals with increasing concentrations of chloride-ions in the electrolyte shifted to more negative region. The increase in the concentration of alloying element in lead contributes to the value of pitting potential and repassivation in all environments, regardless of the concentration of chloride-ions. Corrosion current density and thus the corrosion rate of alloys systems Pb-Ca (Sr, Ba) with increasing concentrations of chloride ions increases. This dependence is typical for all alloys, regardless of their composition and characteristics of physical and chemical properties of the doping component. Fig. 2. Ref. 15.

**Keywords:** lead, alkaline earth metals, potentiodynamic method of electrochemical corrosion, anodic behavior, corrosion potential, corrosion rate.

#### УДК 536.66:662.61

Прогнозирование эмиссии диоксида углерода на основе углеродного потенциала топлива / Стерлигов В.В., Татарина Е.С., Чикурова И.В. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 54.

Рассмотрен новый подход при выборе топлива на основе различных сторон его качества. Предложен комплексный стоимостный показатель энергоэкологической эффективности топлива. Показана возможность расчета теплоты сгорания газообразного топлива на основе элементарного состава как для твердого топлива.

**Ключевые слова:** топливо, эмиссия углекислоты, углеродный баланс, комплексный стоимостный показатель.

Prediction of carbon dioxide emissions based on fuel carbon potential / Sterligov V.V., Tatarinova E.S., Chikurova I.V. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 54.

A new approach is considered when choosing fuel on the basis of various qualities. A complex cost indicator of the energy and environmental efficiency of fuel is proposed. The possibility for calculation of combustion heat of gaseous fuels based on the elementary composition as for solid fuel is shown.

**Keywords:** fuel, carbon dioxide emissions, carbon balance, integrated cost index.

#### УДК 658.378.386.1.083.74

Анализ структуры и содержания профессиональных стандартов в области металлургического производства / Гринкевич О.В., Романенко Ю.Е. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 59.

Рассмотрена структура и содержание профессиональных стандартов в области металлургического производства, а также проведен анализ содержащейся в них информации с точки зрения возможного трудоустройства выпускника высшего учебного заведения, получившего диплом бакалавра по направлению 22.03.20 Металлургия. Табл. 4. Библ. 7.

**Ключевые слова:** профессиональные стандарты, уровни квалификации, металлургия черных металлов, высшее образование, бакалавриат.

Analysis of the structure and content of professional standards of metallurgical production / Grinkevich O.V., Romanenko Yu.E. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 59.

The structure and content of professional standards in the field of steel production is considered, as well as the analysis of the information contained in them from the point of view of possible employment of higher education graduates having received a bachelor's degree within the direction of 22.03.20 Metallurgy, is carried out. Table 4. Ref. 7.

**Keywords:** professional standards, skill levels, metallurgy of ferrous metals, higher education, bachelor's degree.

**УДК 37/331.44:330.3**

О необходимости и особенностях развития человеческого капитала при инновационной модели развития России / Казанцева Г.Г. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 63.

Выбранный правительством Российской Федерации инновационный путь развития страны ставит новую задачу – развитие общества. Население страны массово должно быть способным развивать научное знание, изобретать, производить и использовать инновации в своей жизни и получать доходы от их реализации в другие государства. Для этого необходим рост уровня развития человеческого капитала. На формирование национального человеческого капитала влияют многие факторы, начиная с поведенческих характеристик, заканчивая уровнем доходов и качеством жизни населения. Важно определить, какие из факторов являются преградой в развитии национального человеческого капитала, а какие его – сильной стороной и могут поспособствовать успешному развитию инновационной модели страны и достижению конкурентных преимуществ на международных рынках высокотехнологичных товаров и услуг.

**Ключевые слова:** Россия, инновация, человеческий капитал, факторы развития, сложности, страна, регион.

On the need and characteristics of human capital development for the innovation model of Russia's development / Kazantseva G.G. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 1 (19). – P. 63.

The innovative way of country development chosen by the government of the Russian Federation sets a new task – the society development. The population of the country should be massively able to develop scientific knowledge, invent, produce and use innovations in their lives and receive income from their export to other states. This requires an increase in the level of development of human capital. The formation of national human capital is influenced by many factors, beginning with behavioral characteristics, ending with the level of income and quality of life of the population. It is important to determine which of the factors are an obstacle for the development of national human capital, and which of its strengths can contribute to the successful development of the country's innovation model and the achievement of competitive advantages in the international markets for high-tech goods and services.

**Keywords:** Russia, innovation, human capital, development factors, complexities, country, region.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

Металлургия и материаловедение.

Горное дело и геотехнологии.

Машиностроение и транспорт.

Энергетика и электротехнологии.

Химия и химические технологии.

Архитектура и строительство.

Автоматизация и информационные технологии.

Экология и рациональное природопользование.

Экономика и управление.

Гуманитарные науки.

Отклики, рецензии, биографии.

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения и экспертное заключение.

Кроме того, необходимо разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии).

В редакцию следует направлять электронный вариант и два экземпляра статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте на e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru.

Таблицы, библиографический список и подрисуночный текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75x75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов \*.bmp, \*.jpg, \*.gif, \*.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи пространственных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (\*.xls, \*.vsd и др.). На обратной стороне рисунка должны стоять порядковый номер, соответ-

ствующий номеру рисунка в тексте, фамилии авторов, название статьи.

Формулы вписываются четко. Шрифтовое оформление физических величин следующее: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Если формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, следить, чтобы масштаб формул был 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 8 – 10 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, и трех рисунков.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон и E-mail). Необходимо указать с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать не в виде подстрочных сносок, а общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой.

Перечень литературных источников рекомендуется не менее 10. Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.2 – 2003: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация в двух экземплярах объемом не менее 1/2 страницы текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, а также ключевые слова.

В конце статьи необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть

уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ и представлены на сайте СибГИУ ([www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)) в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

Над номером работали

Темлянцев М.В., *главный редактор*

Коновалов С.В., *ответственный секретарь*

Олендаренко Н.П., *ведущий редактор*

Бащенко Л.П., *ведущий редактор*

Неунывахина Д.Т., *ведущий редактор*

Темлянцева Е.Н., *верстка*

Олендаренко Е.В., *менеджер по работе с клиентами*