

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15

УДК 621.791:658

## Математическое моделирование и автоматизация технологической подготовки производства сварных конструкций

Канд. техн. наук, доц. П. В. Занковец<sup>1)</sup>, чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** На основе состава и структуры информационных потоков в технологическом процессе сварки разработаны модели и методы представления данных и знаний и создана база данных и знаний. Информация в базе данных и знаний представлена в виде многоуровневой иерархической структуры, организована по функциональному назначению в виде отдельных файлов. Каждый файл содержит множество таблиц. С использованием математического моделирования и информационных технологий разработана экспертная система для принятия проектных решений при конструировании и технологической подготовке производства сварных конструкций, позволяющая осуществлять технически обоснованный выбор свариваемых и сварочных материалов, типов сварных соединений, способов, параметров и режимов сварки. Разработанная система дает возможность повысить качество принимаемых проектных решений за счет сокращения затрат ручного труда на работу с нормативно-справочной документацией, анализ и оценку множества возможных альтернатив, сократить затраты труда при отработке конструкций на технологичность, обеспечить снижение материалоемкости сварных конструкций и на этом этапе гарантировать бездефектное формирование сварных соединений.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, сварные соединения, базы данных и знаний, дефектность, причины брака, доминирующие факторы, уровень качества

**Для цитирования:** Занковец, П. В. Математическое моделирование и автоматизация технологической подготовки производства сварных конструкций / П. В. Занковец, В. К. Шелег // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 5–15. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15

## Mathematical Simulation and Automation of Process Engineering for Welded Structure Production

P. V. Zankovets<sup>1)</sup>, V. K. Sheleg<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Models and methods for presentation of database and knowledge base have been developed on the basis of composition and structure of data flow in technological process of welding. The information in data and knowledge base is presented in the form of multilevel hierarchical structure and it is organized according to its functionality in the form of separate files. Each file contains a great number of tables. While using mathematical simulation and information technologies an expert system has been developed with the purpose to take decisions in designing and process engineering for production of welded structures. The system makes it possible to carry out technically substantiated selection of welded and welding materials,

---

### Адрес для переписки

Занковец Павел Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 24,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-92-39  
pmstm@bntu.by

### Address for correspondence

Zankovets Pavel V.  
Belarusian National Technical University  
24 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-92-39  
pmstm@bntu.by

sttypes of welded connections, welding methods, parameters and modes of welding. The developed system allows to improve quality of the accepted design decisions due to reduction of manual labour costs for work with normative-reference documentation, analysis and evaluation of dozens of possible alternatives. The system also permits to reduce labour inputs for testing structures on technological effectiveness, to ensure reduction of materials consumption for welded structures, to guarantee faultless formation of welded connections at this stage.

**Keywords:** arc welding, welded connections, data and knowledge base, unsoundness, cause of defects, dominating factors, quality level

**For citation:** Zankovets P. V., Sheleg V. K. (2017) Mathematical Simulation and Automation of Process Engineering for Welded Structure Production. *Science and Technology*, 16 (1), 5–15. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15 (in Russian)

Процесс конструирования, разработки технологии сборки и сварки конструкции является основополагающим в сварочном производстве. На этом этапе определяется, что требуется сварить (материал свариваемой конструкции), чем и в каких условиях варить (сварочные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование), как варить (тип сварного соединения, способ, параметры и режимы сварки) и кто будет варить (квалификация сварщика). Только безусловное выполнение и учет всех требований и взаимозависимости факторных связей позволяют изготавливать бездефектные сварные соединения [1–5]. Неправильный выбор хотя бы одного факторного параметра технологического процесса приводит к дефектам сварного соединения.

Для исключения таких ситуаций в процессе конструкторско-технологической подготовки, обоснованного выбора требуемых параметров технологии сборки и сварки металлоконструкций авторами разработана и внедрена на ряде предприятий республики автоматизированная экспертная система принятия проектных решений в сварке [4–6]. Предлагаемая система явля-

ется одной из важнейших в сварочном производстве. Автоматизация процесса конструирования и разработки технологии позволяет оперативно получать требуемую информацию и обоснованные рекомендации по проблемам оптимального выбора материала сварной конструкции, способа и режимов сварки, сварочных материалов и типов сварных соединений. Общая структура экспертной системы (ЭС) приведена на рис. 1.

В диалоге по запросу пользователя обеспечивается получение информации по наиболее распространенным способам сварки (ручной дуговой покрытыми электродами, в защитных газах и под флюсом) и стандартным сварным соединениям, предусмотренным этими способами сварки. На основании выполненных исследований и информации, необходимой при конструкторской и технологической подготовке производства сварных конструкций, разработана структура автоматизированной системы, состоящая из базы данных и знаний (БД и З), программ анализа, расчета и выдачи информации, необходимой для конструктора или технолога.

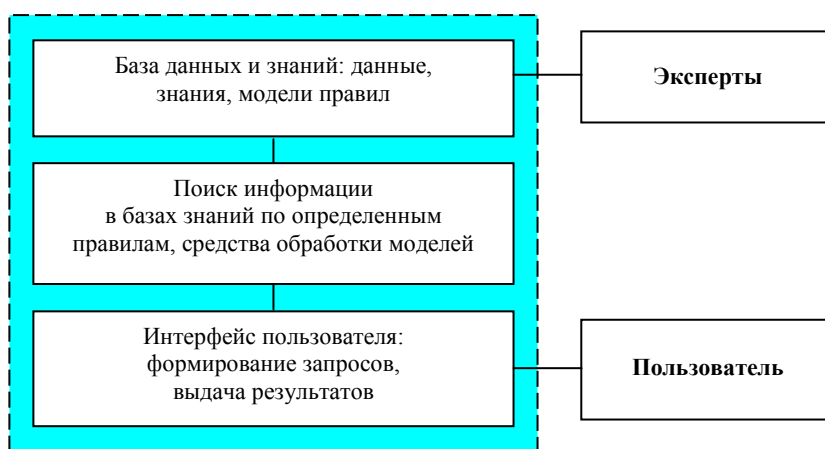


Рис. 1. Общая структура экспертной системы

Fig. 1. General structure of expert system

С учетом состава и структуры информационных потоков в сварке разработаны модели и методы представления данных и знаний и создана БД и З. Информация в БД и З представлена в виде многоуровневой иерархической структуры, организована по функциональному назначению в виде отдельных файлов. Каждый файл содержит множество таблиц. Формирование структур таблиц и запись их в файлы БД и З на магнитные носители выполнены средствами СУБД InterBase 6.5. База данных является открытой для дополнения и корректировки и имеет защиту от несанкционированного доступа. Вывод на экран и принтер, а также работа по дополнению и корректировке таблиц БД и З могут выполняться средствами SQL Explorer, IVExpert и др.

Общий технологический процесс в системе максимально упрощен для работы конструктора или технолога и представляет собой комплекс программ, состоящий из семи диалоговых систем, объединенных в головной управ-

ляющей программе. Каждая из систем содержит в своем составе БД и З, базу правил и программы логического вывода. Системы могут вызываться автономно или из управляющей программы. В БД и З записана структурированная информация, необходимая для работы систем. База правил содержит идентификаторы понятий и объектов, ключевые слова, модели запросов, производные правила (ориентированные на прямой логический вывод) и фреймы. Системы по усмотрению пользователя могут работать в нескольких режимах: поиска информации по ключевым словам, выбора модели запроса из базы правил или формирования запроса с помощью разработанного для этих целей проблемно-ориентированного языка высокого уровня. Окно вызова систем из управляющей программы ЭС представлено на рис. 2.

Состав БД и З приведен в табл. 1. Каждый из представленных в табл. 1 файлов состоит из множества данных (числовых и текстовых).

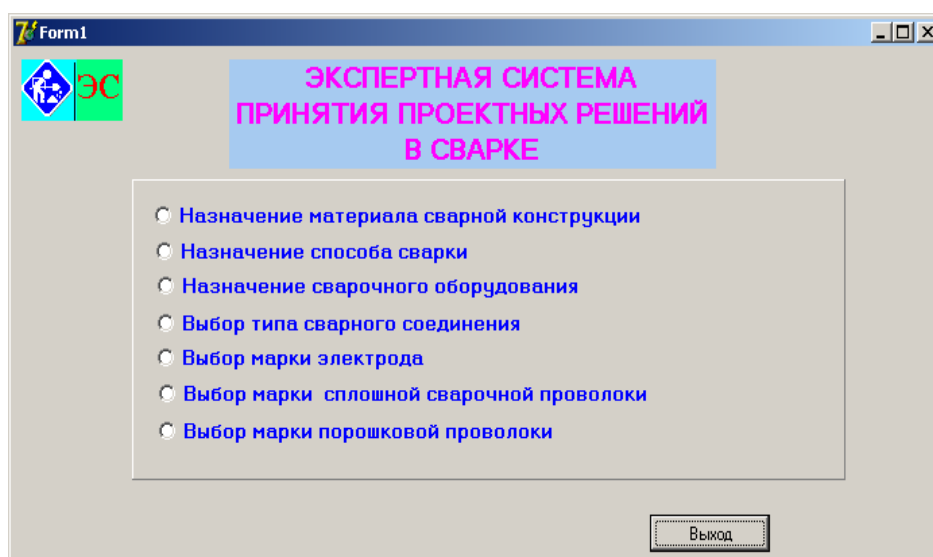


Рис. 2. Окно вызова систем из управляющей программы экспертной системы

Fig. 2. Window for system call from control software program of expert system

Таблица 1

Группы понятий и объектов базы данных и знаний  
Groups of notions and objects for database and knowledge base

Наименование понятия	Наименование групп понятий и объектов		Имя файла базы данных
«Сварка»	Свариваемые материалы		BazaDKSvar
	Способы сварки		Gosts_SpSv
	Сварочные материалы	Покрытые электроды Порошковая проволока Металлическая проволока сплошного сечения	Baza_Weld_El Svaro4n_Mat Svar_ProvSp
	Типы сварных соединений		TipS_SvSoed
«Резка»	Механическая		
	Термическая		

Программы логического вывода по запросу пользователя (конструктора или технолога) обеспечивают оперативное получение требуемой информации для принятия проектных решений, рекомендаций и пояснений обоснованности вывода. В результате формирования запроса или выбора его из базы правил на экран выводится фрейм с определенным набором полей для ввода данных. Система предлагает ввести данные и ответить на поставленные вопросы, после этого она выполняет поиск и вывод на экран одного или нескольких приемлемых решений. Окончательное принятие того или иного решения остается за пользователем.

Для каждой из групп сталей и сплавов созданы таблицы, содержащие марки сталей, номера стандартов, заменители выбранной марки, их технологические свойства и другие сведения. Следует отметить, что именно технологические свойства наиболее интересны для специалистов, занимающихся разработкой новых сварочных технологий и оптимизацией качества существующих сборочно-сварочных процессов [5–9].

Из всего комплекса технологических свойств сталей в БД и З системы приведены только свойства, относящиеся к сварке, а именно связанные с проблемой качества свариваемости. Свариваемые материалы систематизированы по группам и приведены в табл. 2. Свариваемость сталей и сплавов является комплексной характеристикой, определяющейся, с одной стороны, технологическими трудностями, возникающими при сварке, а с другой – отсутствием дефектов и эксплуатационной надежностью сварных соединений.

Таблица 2

Систематизация свариваемых материалов  
Systemization of welded materials

Код группы (KOD_GR)	Наименование группы (NAIMT_GRM)
1	Стали углеродистые обыкновенного качества
2	Стали углеродистые качественные
3	Стали легированные
4	Стали теплоустойчивые
5	Стали и сплавы высоколегированные коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные
6	Стали и сплавы для отливок
7	Алюминий и алюминиевые сплавы
8	Медь и медно-никелевые сплавы
9	Титан и его сплавы
10	Магниеые сплавы
11	Тугоплавкие

При создании БД и З в качестве основных приняты характеристики так называемой тех-

нологической свариваемости, по которой материал условно разделен на следующие группы:

- материал, свариваемый без ограничений (при сварке нет необходимости применения каких-либо дополнительных технологических операций, например подогрева, промежуточной термообработки и т. п., названный в таблицах БД и З как хорошо свариваемый);
- ограниченно свариваемый материал (при сварке рекомендуются или необходимы дополнительные технологические операции);
- трудносвариваемый материал (невозможно получить качественное соединение без обязательного применения дополнительных операций);
- материал, не применяемый для изготовления сварных конструкций;
- материал, не имеющий сведений по свариваемости.

Характеристика свариваемости сталей и сплавов в БД и З состоит из трех частей:

- код группы и оценка свариваемости материала;
- рекомендуемые способы сварки;
- необходимость дополнительных технологических операций при сварке.

Приняты следующие обозначения способов сварки:

- РДС – ручная дуговая сварка покрытым электродом;
- АДС – автоматическая дуговая сварка;
- АФ – автоматическая сварка под флюсом;
- МП – механизированная сварка плавящимся электродом в защитном газе ( $CO_2$ ,  $CO_2 + Ar$ );
- ЭШС – электрошлаковая сварка;
- КТС – контактная сварка;
- РАДС – аргодуговая сварка;
- ЭЛ – электронно-лучевая сварка.

Группа свариваемости определяется химическим составом материала, степенью разработки технологических приемов сварки и освоения в производственных условиях. Способы сварки являются рекомендованными, возможно использование других, применяемых в производстве.

С каждой маркой стали связаны таблицы химического состава, назначения, механических характеристик и основных технологических особенностей материала. Пример и результаты работы с системой назначения материала свариваемой конструкции приведен на рис. 3. БД и З по свариваемым материалам содержит: стали конструкционные углеродистые обыкновенного качества общего назначения; стали конструкционные углеродистые качест-

венные; стали конструкционные легированные, стали конструкционные теплоустойчивые; стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие; стали и сплавы для отливок. По каждой из групп сталей и сплавов может быть получена следующая информация: наименование группы материала и марка; группа и оценка свариваемости; заменитель выбранной марки и технологические свойства. Также для каждой марки стали приведены химический состав, основное назначение и применение.

В связи с различием структуры, данные и знания по сварочным материалам размещены в отдельных файлах по видам материалов: покрытые электроды, металлическая проволока сплошного сечения, порошковая проволока. Файл покрытых электродов, применяемых для ручной дуговой сварки, наплавки и резки (Baza\_Weld\_El), содержит практически все известные марки и может постоянно обновляться и расширяться. По каждой из марок в БД и З приведены: основное назначение, технические характеристики, включая производительность сварки и наплавки, типичные механические свойства металла шва при нормальной (кроме особо оговоренных случаев) температуре, ти-

пичный химический состав наплавленного металла, рекомендуемые режимы сварки, технологические особенности применения, условное обозначение электродов или обозначение электродов в документации, соответствие электродов зарубежным стандартам (американскому AWS, международному ISO, немецкому DIN), принятая в соответствии с ГОСТ 9466–75 буквенно-цифровая структура условного обозначения электродов. В этом же файле записаны сведения по неплавящимся (вольфрамовым) электродам.

Файл Svar\_ProvSp содержит информацию по металлическим проволокам сплошного сечения, применяемым для сварки в защитных газах и под флюсом. При выборе пользователем способа сварки и марки проволоки для проведения сравнительного анализа и принятия решения на экран монитора будет выведена следующая информация: основное применение, химический состав проволоки, механические свойства металла сварного шва (для сварки в защитном газе), состояние проволоки (для сварки под флюсом) и рекомендуемые защитные материалы (для сварки под флюсом).

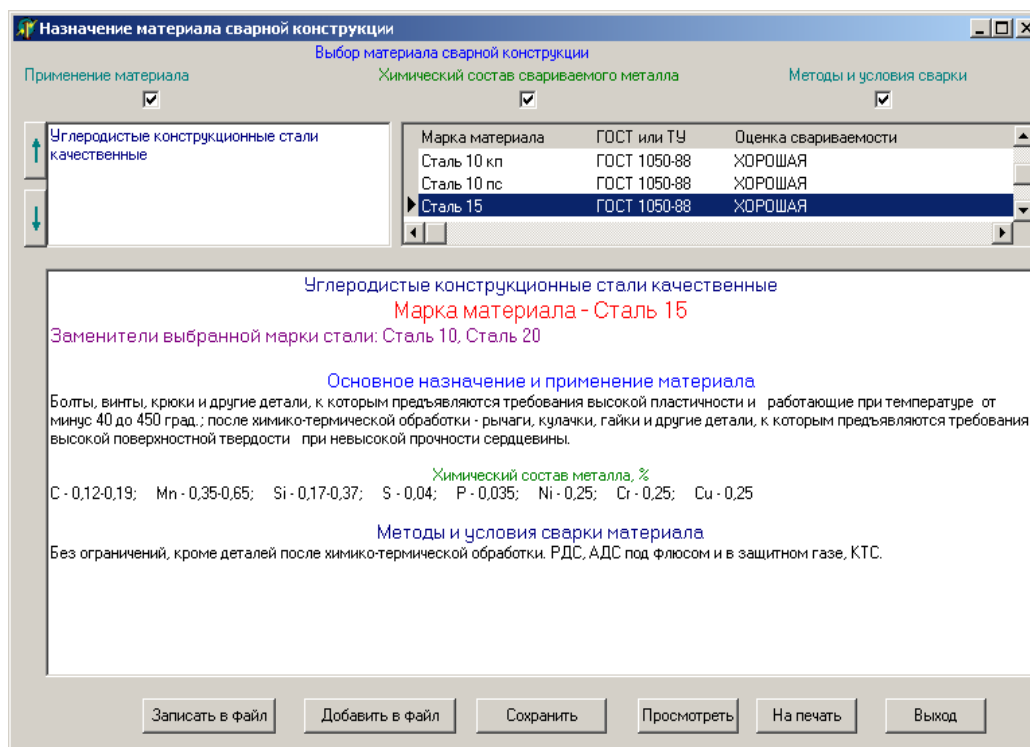


Рис. 3. Пример и результаты работы с технологией назначения материала свариваемой конструкции

Fig. 3. Example and results of work with application technology for material of welded structure

Файл Svago4n\_Mat содержит данные и знания по порошковым проволокам, БД и 3 – информацию по пяти группам свариваемых материалов (стали, чугуны). Каждой из групп свариваемых материалов соответствует подмножество марок порошковых проволок, допустимых для выполнения сварки. Для выбранной марки порошковой проволоки система обеспечивает вывод на экран такой информации, как: назначение, область применения и рекомендации; диаметр, конструкция, тип; сварочные свойства и особенности технологии сварки; химический состав наплавленного металла; механические характеристики металла шва; физические свойства, параметры режима сварки. Защитные материалы (флюсы, газы и их смеси) сгруппированы по видам и размещены в файле BazaDKSvar. Основные виды флюсов приведены в табл. 3.

Каждому виду флюса в БД и 3 поставлено в соответствие подмножество марок флюсов, рекомендуемых для применения. Основные виды защитных газов приведены в табл. 4. Каждому

виду защитных газов в БД и 3 поставлено в соответствие подмножество наименований газов и смесей, рекомендуемых для применения.

Таблица 3

Виды флюсов по содержанию кремния  
Types of fluxes according to silicon content

Код	Вид флюса
1	Высокремнистый
2	Низкремнистый
3	Бескремнистый

Таблица 4

Виды защитных газов  
Types of protective gas

Код	Вид газа
1	Инертный
2	Смесь инертного и активного
3	Активный

Пример и результат работы с системой выбора покрытых электродов для ручной дуговой сварки, наплавки и резки приведены на рис. 4, а пример и результат работы с системой выбора порошковой проволоки – на рис. 5.

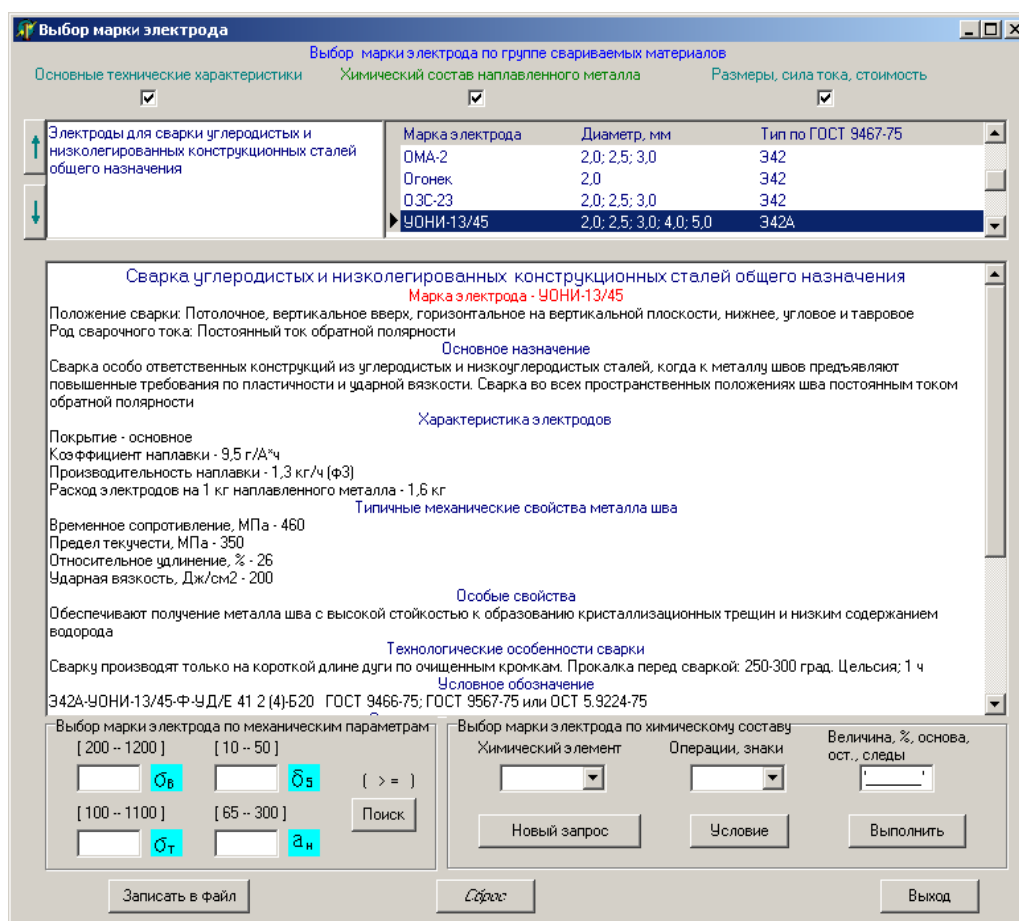


Рис. 4. Пример и результат работы с системой выбора покрытых электродов для ручной дуговой сварки, наплавки и резки

Fig. 4. Example and results of work with selection system of coated electrodes for manual arc welding, depositing and cutting

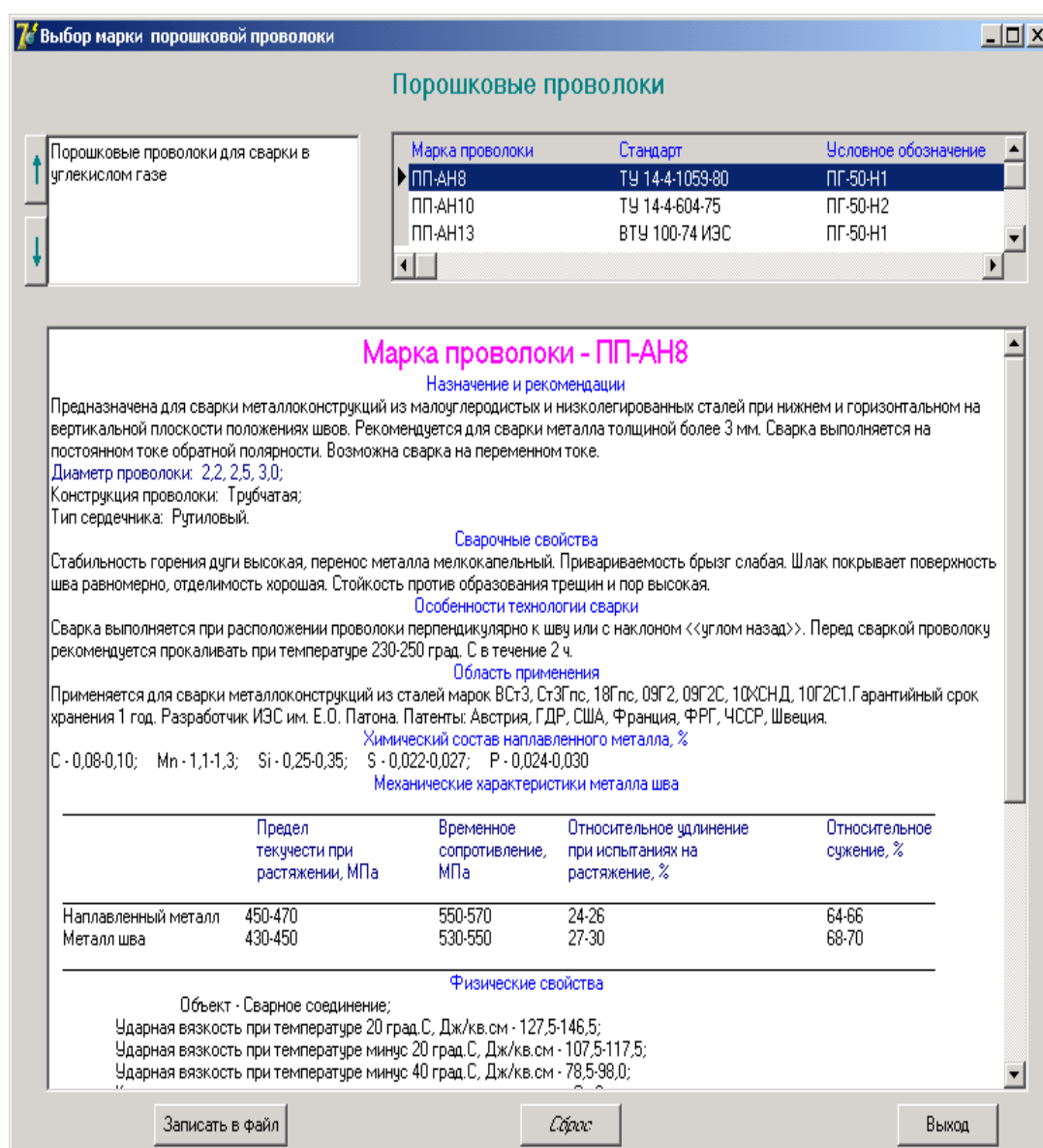


Рис. 5. Пример и результат работы с системой выбора порошковой проволоки

Fig. 5. Example and results of work with selection system of flux cored wire

Для получения информации о сплошных металлических проволоках необходимо задать способ сварки, затем отметить, какая информация нужна (химический состав и/или механические свойства металла сварного шва), и марку проволоки. Пример и результат работы с системой выбора металлической проволоки сплошного сечения приведен на рис. 6.

Данные и знания по способам сварки записаны в файле Gosts\_SpSv, состав БД и 3 приведен в табл. 5.

Типы стандартных сварных соединений в БД и 3 представлены по ГОСТам на спосо-

бы сварки и записаны в формате .bmp в виде отдельных файлов. Система, позволяющая выбирать способ сварки, ограничена подмножеством наиболее распространенных способов в машино- и приборостроении, строительстве, в то же время она открыта для дополнения и развития. База способов сварки представлена отдельным файлом, содержащим подмножество таблиц, в которых приведены код способа, обозначение по стандарту и наименование. Исходными данными для назначения способа сварки являются группа материала и марка.

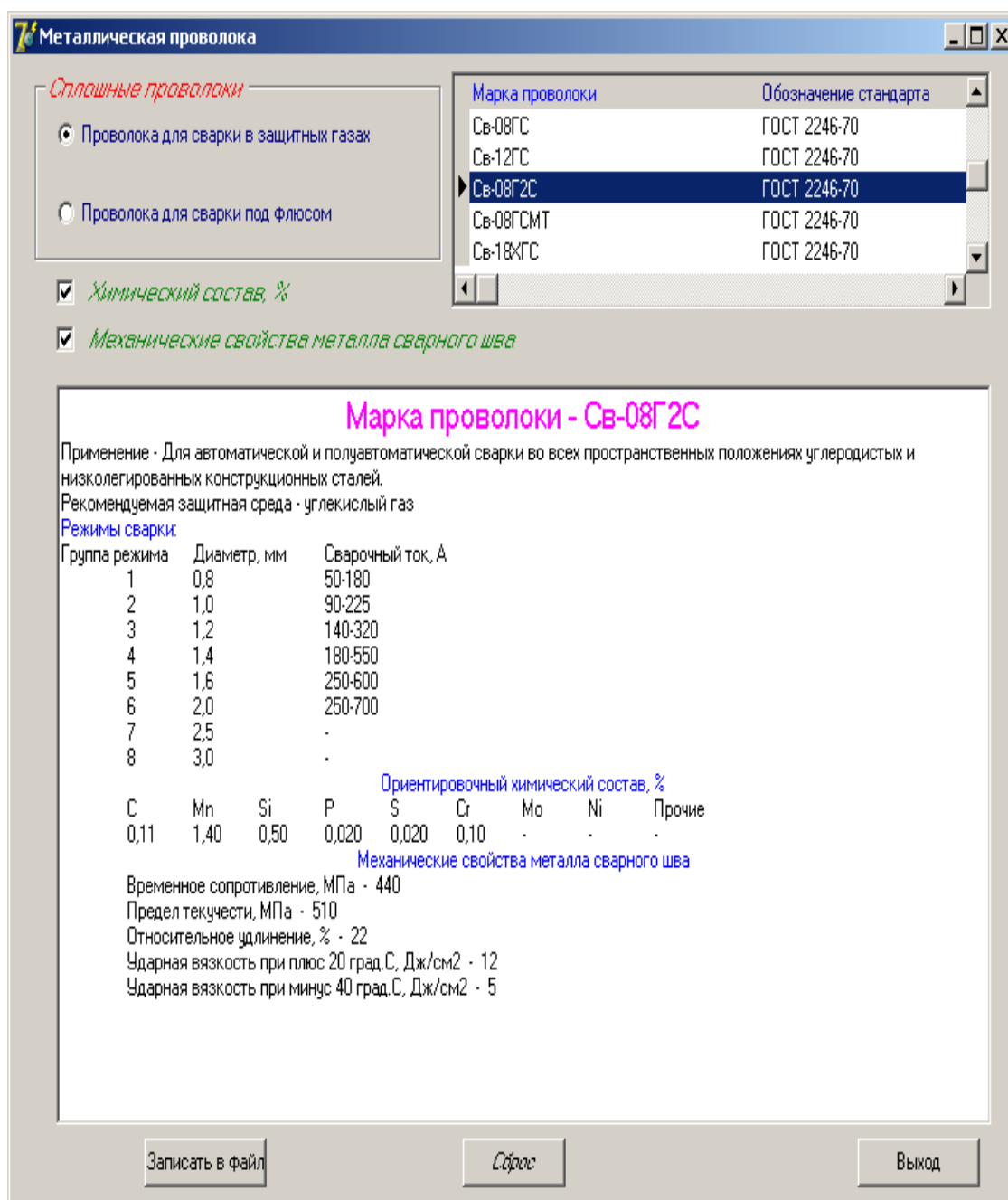


Рис. 6. Пример и результат работы с системой выбора металлической проволоки сплошного сечения

Fig. 6. Example and results of work with selection system of continuous metal wire

Таблица 5

Состав базы данных и знаний по способам сварки  
 Composition of database and knowledge base according to welding types

Код стандарта (Kod GOST)	Наименование стандарта (NaimGOST)	Номер стандарта (NomGOST)	Обозначение способа сварки (OboznSS)	Код способа сварки (KSS)	Номер таблицы (NomTab)
1	2	3	4	5	6
1	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные	ГОСТ 5264-80	П	1	Tab01_01



Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6
2	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные	ГОСТ 14771–76	РИН	31	Tab02_31
			АИН	32	Tab02_32
			РИНп	20	Tab02_20
			АИНп	21	Tab02_21
			АИНп-3	22	Tab02_22
			АИП	23	Tab02_23
			МИП	24	Tab02_24
			МУП	3	Tab02_03
3	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные	ГОСТ 14806–80	АУП	4	Tab02_04
			РИНп	20	Tab03_20
			АИНп	21	Tab03_21
			АИНп-3	22	Tab03_22
4	Сварка под флюсом. Соединения сварные	ГОСТ 8713–79	АИП	23	Tab03_23
			МИП	24	Tab03_24
			АФ	10	Tab04_10
			АФф	11	Tab04_11
			Афм	12	Tab04_12
			Афо	13	Tab04_13
			Афп	14	Tab04_14
			Афш	15	Tab04_15
			Афк	16	Tab04_16
			МФ	6	Tab04_06
8	Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами	ГОСТ 23518–79	Мфо	7	Tab04_07
			МФш	8	Tab04_08
			МФк	9	Tab04_09
			РИН	31	Tab08_31
			АИН	32	Tab08_32
			АИНп	21	Tab08_21
			РИНп	20	Tab08_20
			АИП	23	Tab08_23
6	Автоматическая и полу- автоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами	ГОСТ 11533–75	МИП	24	Tab08_24
			МУП	3	Tab08_03
			АУП	4	Tab08_04
			АФ	10	Tab06_10
			АФс	13	Tab06_13
1	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами	ГОСТ 11534–75	Афпш	15	Tab06_15
			МФ	6	Tab06_06
9	Дуговая сварка. Соединения сварные стальных трубопроводов	ГОСТ 16037–80	МФс	7	Tab06_07
			МФпш	8	Tab06_08
			П	11	Tab01_11
			Р	1	Tab09_01
			ЗП	3	Tab09_03
10	Дуговая сварка. Соединения сварные трубопроводов из меди и медно-никелевого сплава	ГОСТ 16038–80	ЗН	31	Tab09_31
			Ф	6	Tab09_06
			Г	50	Tab09_50
			ЗН/ЗП	31/3	Tab10_31/3
13	Контактная сварка. Соединения сварные	ГОСТ 15878–79	Р	1	Tab10_01
			ЗП	3	Tab10_03
			ЗН	31	Tab10_31
13	Контактная сварка. Соединения сварные	ГОСТ 15878–79	Кт	36	Tab13_36
			Кш	37	Tab13_37
			Кр	38	Tab13_38

В качестве сварочных материалов, применяемых для ручной дуговой сварки, механизированной и автоматизированной сварки в защит-

ных газах и под флюсом используются покрытые электроды, проволока, защитные газы и флюсы. БД и З экспертной системы по свароч-

ным материалам состоит из четырех файлов. Данные по электродам для сварки, наплавки и резки размещены в файле Baza\_Weld\_El, по порошковым проволокам – в файле Svaro4n\_Mat, по металлическим проволокам сплошного сечения – в файле Svar\_ProvSp, по защитным газам и флюсам – в таблицах файла BazaDKSvar. В каждом из файлов содержится некоторое подмножество таблиц.

Типы сварных соединений в системе представлены для наиболее распространенных в машиностроении и строительстве способов сварки. Имеется дополнительная возможность ознакомиться с общими требованиями к сварным конструкциям, типам сварных соединений и технологической доступности при выполнении сварки. Пример и результат работы с системой выбора типа сварного соединения приведены на рис. 7.

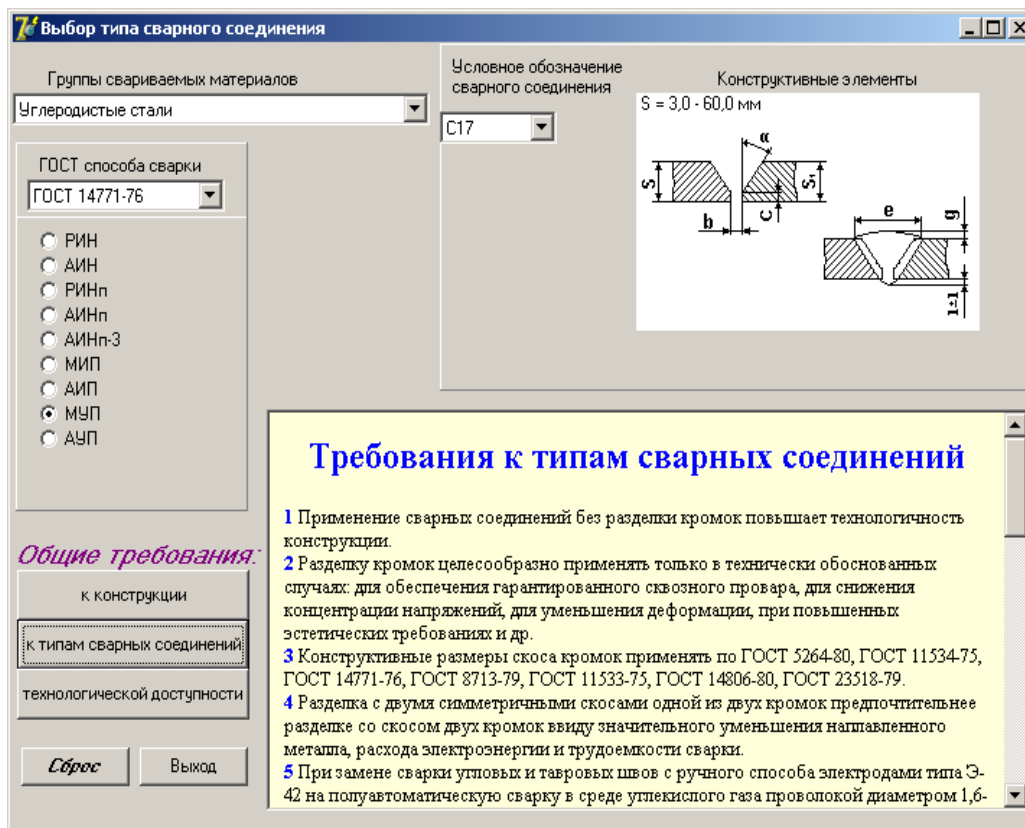


Рис. 7. Пример и результат работы с системой выбора типа сварного соединения

Fig. 7. Example and results of work with selection system of welding joint type

### ВЫВОДЫ

1. С учетом требований международных и отечественных стандартов разработаны базы данных и знаний по свариваемым материалам, способам сварки, сварочным материалам, типам сварных соединений, включающие производительность сварки и наплавки, типичные механические свойства металла шва при нормальной (кроме особо оговоренных случаев) температуре, типичный химический состав наплавленного металла и рекомендуемые режимы сварки, технологические особенности применения, условное обозначение электродов или обозначение электродов в документации,

соответствие электродов зарубежным стандартам – американскому (AWS), международному (ISO), немецкому (DIN), принятому в соответствии с ГОСТ 9466–75 буквенно-цифровую структуру условного обозначения электродов.

2. На основе созданных баз данных и знаний разработана экспертная система, позволяющая осуществлять технически обоснованный выбор свариваемых и сварочных материалов, способов сварки, типов сварных соединений и параметров режима сварки, повысить качество принимаемых проектных решений за счет сокращения затрат ручного труда на работу с нормативно-справочной документацией, анализ и оценку множества возможных альтерна-

тив, сократить затраты труда при отработке конструкций на технологичность, обеспечить снижение материалоемкости сварных конструкций и на этом этапе гарантировать бездефектное формирование сварных соединений.

3. Разработанная экспертная система внедрена на ряде предприятий республики, в том числе в ОАО «ЦентроЭнергоМонтаж», ОАО «Промтехмонтаж», ОАО «ГродноАзот», ОАО «Мозырьремспецстрой», ОАО «Белсантехмонтаж-2», ОАО «Мотовело», ЗАО «Атлант».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Занковец, П. В. Математическое моделирование влияния производственных факторов на образование дефектов сварных соединений / П. В. Занковец, В. К. Шелег // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: сб. трудов 2-й междунар. конф. Киев: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2004. С. 95–98.
2. Совершенствование технологических процессов и оптимизация качества сборочно-сварочных работ / П. В. Занковец [и др.]. Минск, 2004. 343 с.
3. Занковец, П. В. Разработка методов и исследование причин дефектности сварных соединений / П. В. Занковец, Г. Н. Здор, В. К. Шелег // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2006. № 2. С. 107–113.
4. Занковец, П. В. Математическое моделирование и информационные технологии в обеспечении качества сварных металлоконструкций / П. В. Занковец // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2007. № 2. С. 120–128.
5. Занковец, П. В. Оптимизация качества и конкурентоспособности сварочной продукции на основе математического моделирования причинно-следственных связей образования дефектов сварных соединений / П. В. Занковец // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: сб. трудов 4-й междунар. конф. Киев: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2009. С. 17–22.
6. Занковец, П. В. Использование математического моделирования для исследования влияния сварочных материалов на качество сварных соединений трубопроводов / П. В. Занковец // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2010. № 4. С. 24–27.
7. Zankovets, P. V. Level of Effect of Preparation End Assembly for Welding on Quality of Welded Joints for Industrial Pipelines / P. V. Zankovets // The Paton Welding Journal. 2011. № 6. P. 40–44.
8. Занковец, П. В. Основы формирования бездефектных сварных соединений в условиях мелкосерийного и единичного сборочно-сварочного производства / П. В. Занковец // Сварка и родственные технологии: сб. докл. Междунар. симпозиума. Минск, 2012. С. 49–54.
9. Занковец П. В. Информационно-аналитические системы в обеспечении качества сварочных работ / П. В. Занковец // Эффективная сварка: качество, безопасность, ресурсосбережение: сб. докл. III межотрасл. науч.-практ. конф. Минск, 2016. С. 143–149.

Поступила 06.07.2016

Подписана в печать 20.09.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

## REFERENCES

1. Zankovets P. V., Sheleg V. K. (2004) Mathematical Simulation of Production Factors Influence on Defect Formation in Welded Joints. *Matematicheskoe Modelirovanie i Informatsionnye Tekhnologii v Svarke i Rodstvennykh Protseсах: Sb. Tr. 2-i Mezhdunar. Konf.* [Mathematical Simulation and Information Technologies in Welding and Allied Processes: Collected Papers of the 2<sup>nd</sup> International Conference]. Kiev, Institute of Electric them. Paton NASU, 95–98 (in Russian).
2. Zankovets P. V., Sheleg V. K., Denisov L. S., Berbasova N. Iu., Pavliuk S. K. (2004) *Improvement of Technological Processes and Quality Optimization for Assembly and Welding Works.* Minsk, Pravo i Ekonomika. 343 (in Russian).
3. Zankovets P. V., Zdor G. N., Sheleg V. K. (2006) Development of Methods and Investigation of Defect Reasons for Welded Joints. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 107–113 (in Russian).
4. Zankovets P. V. (2007) Mathematical Simulation and Information Technologies in Quality Assurance for Welded Metal Structures. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 120–128 (in Russian).
5. Zankovets P. V. (2009) Quality and Competitiveness Optimization for Welding Products on the Basis of Mathematical Simulation of Cause-and-Effect Relations for Defect Formation in Welded Joints. *Matematicheskoe Modelirovanie i Informatsionnye Tekhnologii v Svarke i Rodstvennykh Protseсах: Sb. Tr. 4 Mezhdunar. Konf.* [Mathematical Simulation and Information Technologies in Welding and Allied Processes: Collected Papers of the 4<sup>th</sup> International Conference]. Kiev, Institute of Electric them. Paton NASUP. 17–22 (in Russian).
6. Zankovets P. V. (2010) Usage of Mathematical Simulation for Investigation of Welding Material Influence on Quality of Pipeline Welded Joints. *Truboprovodny Transport (Teoriya i Praktika)* [Pipeline Transport – Theory and Practice], (4), 24–27 (in Russian).
7. Zankovets P. V. (2011) Level of Effect of Preparation and Assembly for Welding on Quality of Welded Joints for Industrial Pipelines. *The Paton Welding Journal*, 6, 40–44.
8. Zankovets P. V. (2012) Fundamentals on Formation of Defectless Welded Joints under Conditions of Small-Scale and Individual Assembly and Welding Production. *Svarka i Rodstvennye Tekhnologii: Sb. Dokl. Mezhdunar. Simp.* [Welding and Allied Technologies: Collected Papers of the International Symposium]. Minsk, 49–54 (in Russian).
9. Zankovets P. V. (2016) Information and Analytical Systems for Welding Work Quality Assurance. *Effektivnaia Svarka: Kachestvo, Bezopasnost, Resursosberezhenie: Sb. Dokl. III Mezhotrasl. Nauch.-Prakt. Konf.* [Effective Welding: Quality, Safety, Resource-Saving: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Inter-Industry Scientific and Practical Conference]. Minsk, 143–149 (in Russian).

Received: 06.07.2016

Accepted: 20.09.2016

Published online: 30.01.2017