DOI 10.52351/00260827_2021_09_102

УДК 621.785.616 : 0044

РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ ПРОГРАММЫ «ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ»

© **Ведыбеда Денис Васильевич** (denis-vedybeda@yandex.ru)

Сталеплавильный отдел технического управления ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Беларусь, г. Жлобин, Гомельская обл.

Статья поступила 24.06.2021 г.

Представлен обзор и краткие результаты разработки специальной программы для расчетов полосы прокаливаемости в зависимости от химического состава стали, используемой инженерно-техническими работниками ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Разработка программы включала несколько этапов работы и реализовывалась по принципу от простого к сложному. Язык программирования C#, интерфейс построен на основе Windows Forms. Среда разработки – Microsoft Visual Studio 2013 Professional. База данных программы создана при помощи среды разработки, представляемой программой для развертывания и разработки баз данных – Microsoft SQL Server 2008. Время разработки с 2016 по 2021 гг., время активной разработки – 2016–2019 гг., число разработчиков – один. В настоящий момент в программу вносятся только данные из новых стандартов для сталей с требованием по полосе прокаливаемости. Данные поддерживаются в актуальном состоянии.

С 2018 по 2021 г. разработана другая версия программы практически с теми же функциями, только в среде разработки Microsoft Visual Basic, встроенной в программу Excel, которая имеет открытый программный код. Эта версия используется на предприятии для повседневной работы.

Таким образом, собственными силами получен программный модуль, включающий несколько вариантов теоретического расчета и базу данных, в которую включена информация из различных технических стандартов. Программа предоставляет возможность получения всевозможных отчетов и блок для анализа данных.

Ключевые слова: прокаливаемость стали; компьютерная программа; расчеты; стандарт; база данных.

Моделирование и расчетные методы все больше внедряются в повседневную рабочую практику инженеров. Экономически выгоднее, имея под рукой инструменты для компьютерного моделирования процессов литья, обработки металлов давлением, термообработки или сварки, сначала провести виртуальные эксперименты и понять целесообразность использования той или иной технологии, прежде чем переводить в брак и отходы ценное сырье и энергоресурсы [1].

За последние несколько лет в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» освоено производство стали широкого спектра марок, предназначенных для изготовления различных узлов и деталей, используемых при сборке автомобилей. Одно из главных требований заказчиков таких сталей – выполнение требований по прокаливаемости стали.

Прокаливаемость – это способность стали воспринимать закалку на определенную глубину, а с привязкой к микроструктуре стали – способность стали получать закаленный слой с мартенситной или троостит-мартенситной структурой и высокой твердостью на определенную глубину [2]. Общепризнанным методом определения прокаливаемости является метод Джомини [3].

Упрощенный принцип проведения испытания по Джомини состоит в следующем: цилиндрический образец, с установленными геометрическими размерами извлекают из прокатанного прутка механическим способом, нагревают до требуемой температуры закалки, выдерживают в печи необходимое время (в зависимости от марки стали), затем извлекают из печи и ставят в специальную установку таким образом, чтобы один торец образца равномерно по всей площади охлаждался струей воды (рис. 1).

После охлаждения до комнатной температуры образец подвергается обработке на шлифовальном станке: вдоль образующей цилиндра снимают металл таким образом, чтобы получить две параллельные плоскости, на которых измеряют твердость в направлении от закаленного тор-

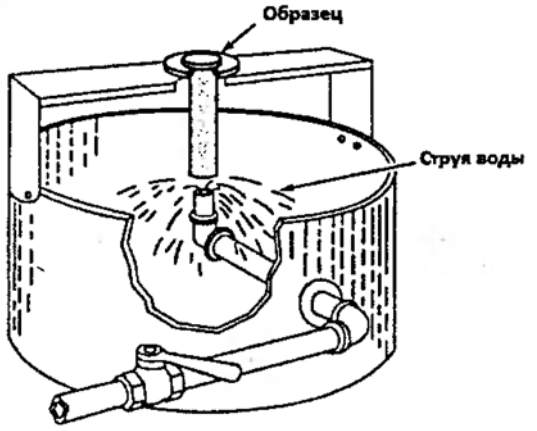

Рис. 1. Установка для определения прокаливаемости по методу Джомини

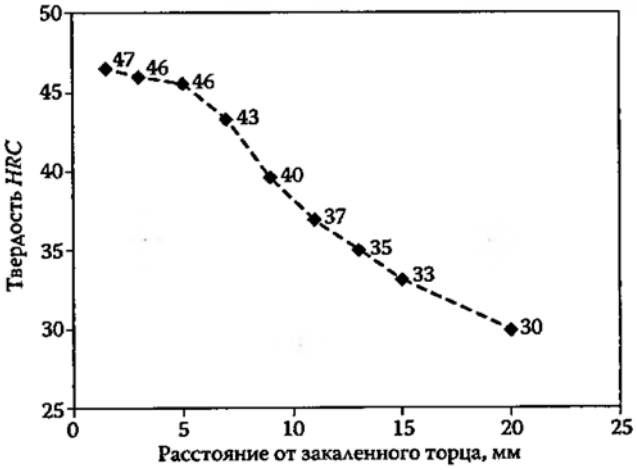

Рис. 2. Пример кривой прокаливаемости

ца к незакаленному. По полученным результатам измерений строят диаграмму твердости – кривую прокаливаемости (рис. 2).

В технических требованиях на стали, предназначенные для закалки и отпуска, установлены нормы прокаливаемости, которые при представлении их в графическом виде будут называться полосами прокаливаемости. Верхняя допустимая граница – это верхняя линия полосы прокаливаемости, нижняя допустимая граница – нижняя линия полосы прокаливаемости. При этом получаемые результаты должны находиться в области, ограниченной этими линиями, т.е. внутри полосы прокаливаемости.

При проведении работ по освоению номенклатуры марок стали для производства автомобильного проката появилась острая необходимость в инструменте, который позволял бы по химическому составу стали быстро определить соответствие смоделированной кривой прокаливаемости требуемым пределам заданной полосы прокаливаемости. Следует отметить, что заказчики автомобильного металлопроката предъявляют к исполнению как стандартные полосы прокаливаемости (согласно общепринятым стандартам на стали), так и собственно разработанные полосы прокаливаемости, указываемые в фирменных спецификациях на металлопродукцию [4–8].

Разработанная в 2016 г. и в настоящее время поддерживаемая в актуальном состоянии компьютерная программа для расчета теоретической кривой прокаливаемости сталей используется для:

– формирования актуальной базы данных полей прокаливаемости;

– проработки технологической возможности изготовления заказов и разработки технологии производства сталей автомобильного сортамента;

– оперативной проверки выполнения требований по полосе прокаливаемости при корректировке химического состава стали в процессе ее внепечной обработки;

– аттестации плавок на соответствие требованиям по полосе прокаливаемости перед передачей их в прокат;

– проверки сходимости теоретических расчетов и фактических испытаний на прокаливаемость;

– в качестве справочника для технологического персонала цехов, ИТР технических служб, службы контроля качества и персонала заводских лабораторий.

В программе собраны и используются данные из специальной документации:

– методы для теоретического расчета кривой прокаливаемости в зависимости от коэффициентов, полученных с помощью множественного регрессионного анализа химического состава массива стали различных марок по SEP 1664, SAE J406 и ASTM A255 [9–11];

– все коэффициенты и формулы для проведения расчетов как для углеродсодержащей стали (углеродистых, легированных без легирования бором), так и борсодержащей стали;

– химические составы и поля прокаливаемости для марок стали по стандартам: DIN EN 10084, DIN EN 10083-3, DIN EN 10083-2, DIN EN 10263-4, DIN 17115, DIN EN 10089, ГОСТ 4543, ГОСТ 1050, ISO 683-2, ISO 683-3, UNI 7847, A304, EN 10297-1.

Всего в программе в настоящий момент представлено 520 полей прокаливаемости для марок стали из приведенных выше стандартов.

Кроме того, реализована возможность для пользователя создавать собственную базу данных, в которую вносятся любые химические составы стали и поля прокаливаемости, при этом

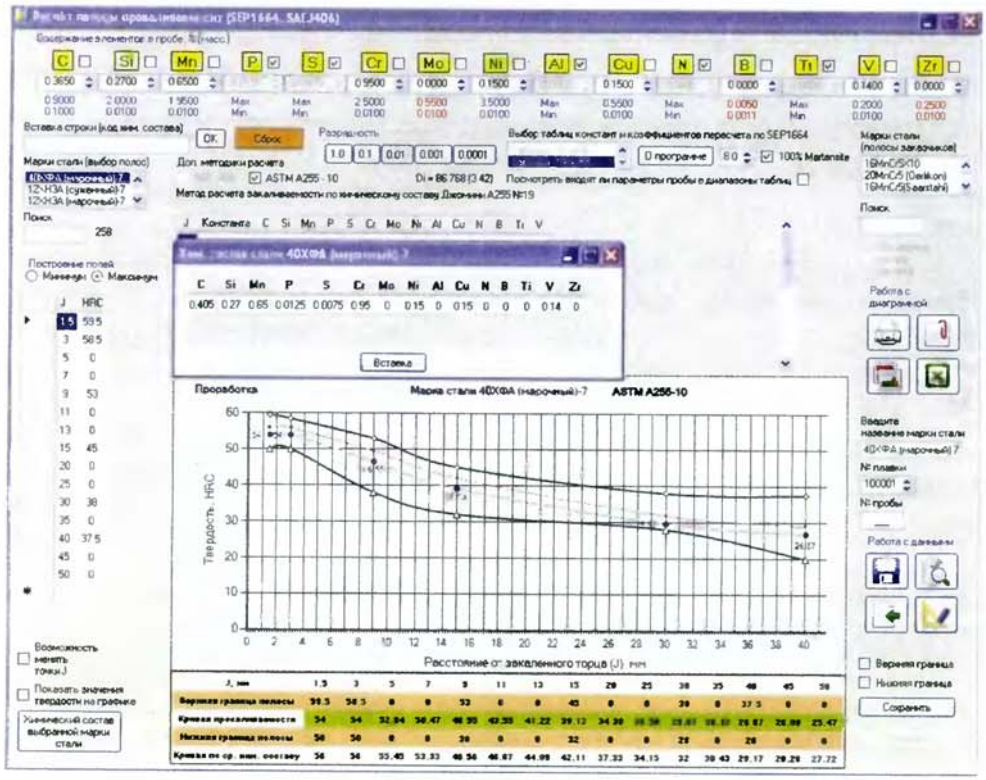

Рис. 3. **Главное окно программы**

база полей прокаливаемости может включать неограниченное число вариантов.

Для удобства пользователей программа имеет возможность удаленной работы по сети по схеме «клиент–сервер», с возможностью работы в реальном времени нескольких пользователей. Главное окно программы представлено на рис. 3.

В верхней части программы представлены окна для ввода химического состава стали.

В центре в списке даны таблицы расчетных коэффициентов по методике SEP 1664 (на рис. 3 таблица коэффициентов закрыта окном с химическим составом рассчитываемой марки стали).

При выборе таблицы коэффициентов по методике расчета SEP 1664 в списке, в поле по центру появляются коэффициенты расчета, соответствующие выбранной таблице (всего 15 таблиц коэффициентов для стали различных групп марок).

Дополнительные методики расчета по SAE J406 и ASTM A255 можно использовать путем нажатия соответствующих кнопок в верхней части окна (под кнопками «ОК» и «Сброс»). При выборе методик по SAE J406 или ASTM A255 открываются дополнительные настройки – выполнение расчетов при 50 или 100% мартенсита, изменение условий расчета в зависимости от размера зерна аустенита.

Стандартные поля прокаливаемости можно выбрать путем нажатия на соответствующую марку стали в списке, который находится слева и справа от главного окна программы (слева – стандартные поля прокаливаемости для стали, справа – для стали по спецификациям заказчиков), в верхней части окна. Ниже списков марок стали имеется поле для ввода полного названия или части названия марки стали для быстрого поиска.

На диаграмме в центральной части главного окна программы отображаются поле прокаливаемости и две кривые; сплошная линия – текущая расчетная кривая прокаливаемости по введенным данным химического состава, тонкая пунктирная линия – кривая, построенная по умолчанию, либо по среднему химическому составу, либо по целевым требованиям химического состава марки стали.

Ниже представлена табличная реализация указанных на диаграмме данных. Если кривая прокаливаемости по фактической химии находится в требуемом поле прокаливаемости, то цифры подсвечиваются зеленым цветом, если получено несоответствие – красным.

В правой части главного окна программы находится функционал для работы с данными.

Верхние четыре кнопки слева направо: печать диаграммы, вывод отчета (можно выводить в файлы .doc, .pdf, .xls), сохранение диаграммы в файлы-рисунки (.jpeg, .png, .bmp, .wmf, .tiff), вывод данных в файл .xls – удобный для формирования отдельных отчетов (например, для вставки в текст аналитической записки).

Нижние четыре кнопки слева направо: сохранение поля прокаливаемости в базу данных, просмотр записей базы данных, подключение заводской базы данных химических анализов через файл .xls (сформированный в программе сталеплавильного производства СУСП «Гефест» – для быстрого ввода химического состава для расчета), кнопка для построения собственных полей прокаливаемости – для ввода полей прокаливаемости заказчиков и последующего их сохранения.

В нижней части главного окна программы находится кнопка «Сохранить», позволяющая со-

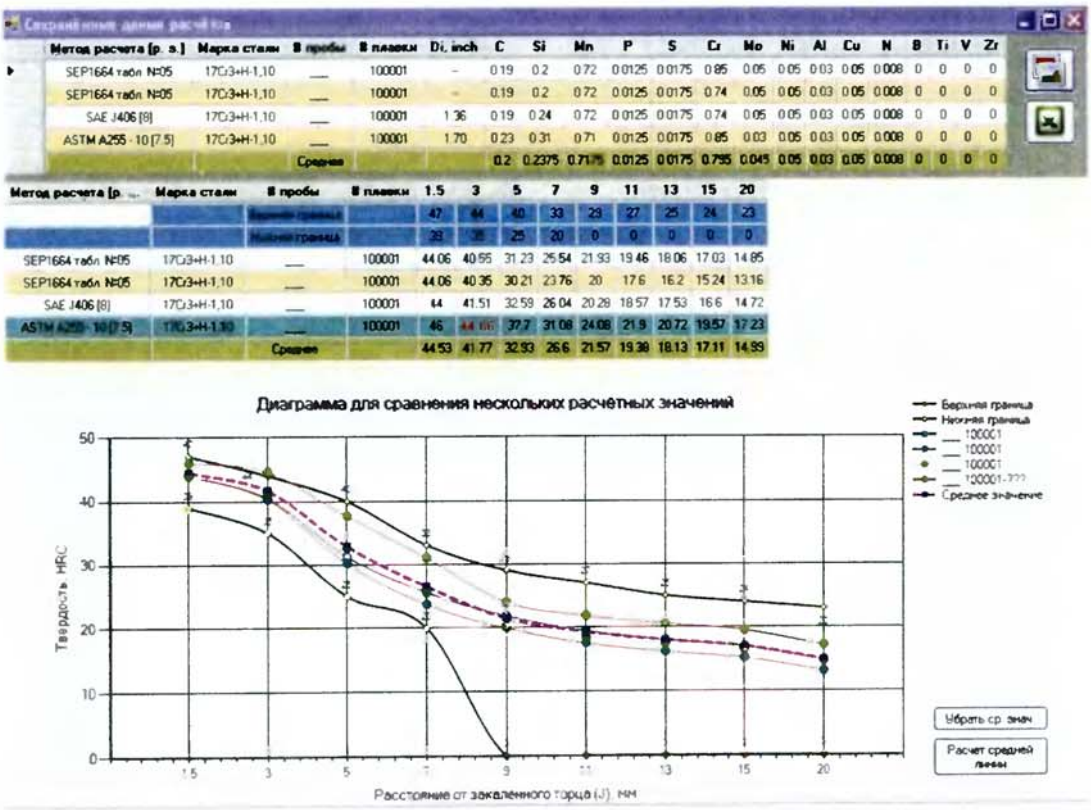

Рис. 4. **Средний результат расчета четырех вариантов химического состава стали по различным методикам оценки**

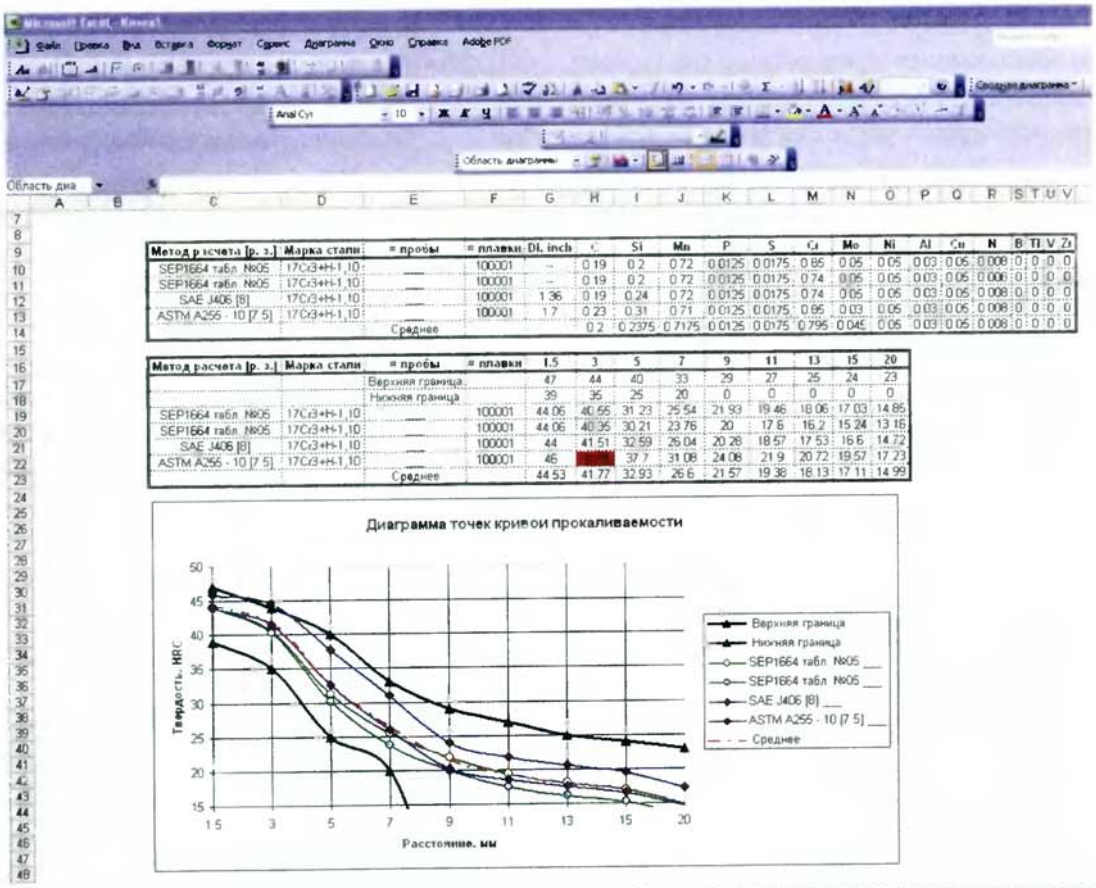

Рис. 5. **Средний результат расчета четырех вариантов химического состава стали по различным методикам, экспортированный в Excel**

хранять до 10 расчетов, проведенных по различным методикам, и выводить на экран результаты этих расчетов с выводом средней результирующей кривой прокаливаемости (рис. 4).

Результаты расчета, представленные на рис. 4, можно также выгрузить в файл Excel (рис. 5) или вывести в виде рисунка при нажатии на соответствующие кнопки.

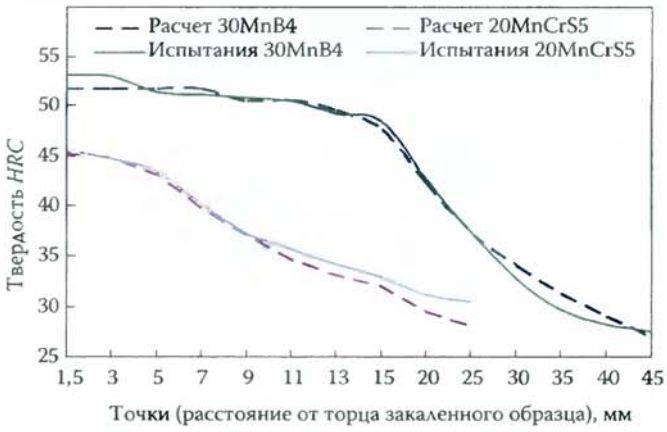

Рис. 6. **Сравнение фактических и теоретических значений кривых прокаливаемости для стали 30MnB4 и 20MnCrS5 (среднее из выборки плавок)**

За время практического использования программой разработаны и освоены более 60 марок стали с требованием по полосе прокаливаемости.

Кроме того, получены удовлетворительные результаты по сходимости теоретического расчета и фактических испытаний (рис. 6), что позволило сократить число испытаний на подтверждение выполнения требования по полосе прокаливаемости, а также определить наиболее подходящие методики расчета кривой прокаливаемости для стали различных групп марок (комбинированные из нескольких методов и отдельные).

Для получения большей сходимости результатов теоретических расчетов и фактических лабораторных испытаний можно вывести собственные уточняющие коэффициенты и константы, отличные от предложенных в методиках SEP 1664, SAE J406 и ASTM A255.

Такая работа должна проводиться при помощи множественного регрессионного анализа массива из не менее 250 плавок стали одной марки. Чем больше плавок подвергается множественному регрессионному анализу, тем точнее будут получены коэффициенты и константы. На этот случай в программе имеется возможность расчетов кривых прокаливаемости по собственным коэффициентам и константам.

На основе идей, реализованных в данной программе, была разработана аналогичная версия под программу Excel с дополнительной справочной информацией и модулем для планирования мелкосерийного производства нескольких заказов в составе одной плавки из стали конкретной марки, но с различными требованиями по полосе прокаливаемости. Это позволило значительно

Отчёт по расчёту полосы прокаливаемости

Марка стали: 42CrMo4+H № пробы: ___ Метод расчета: SAE J406

№ плавки: 100001 Di = 120.071 (4.73) мм (in)

Химический состав стали

Элемент	% масс
C	0.325
Si	0.2
Mn	0.75
P	0.0125
S	0.0175
Cr	1.19
Mo	0.225
Ni	0.22
Al	0.03
Cu	0.2
N	0.015
B	0
Ti	0
V	0
Zr	0.03

Точки и значения твердости

Расстояние от торца закалённого образца, мм	Верхняя граница, HRC	Нижняя граница, HRC	Расчётное значение, HRC			
1.5	61	53	51			⊗
3	61	53	51			⊗
5	61	52	51			⊗
7	60	51	50.5			⊗
9	60	49	49.51	✓		
11	59	43	48.11	✓		
13	59	40	46.36	✓		
15	58	37	44.74	✓		
20	56	34	41.13	✓		
25	53	32	38.06	✓		
30	51	31	36.43	✓		
35	48	30	34.69	✓		
40	47	30	33.55	✓		
45	46	29	32.28	✓		
50	45	29	31.88	✓		

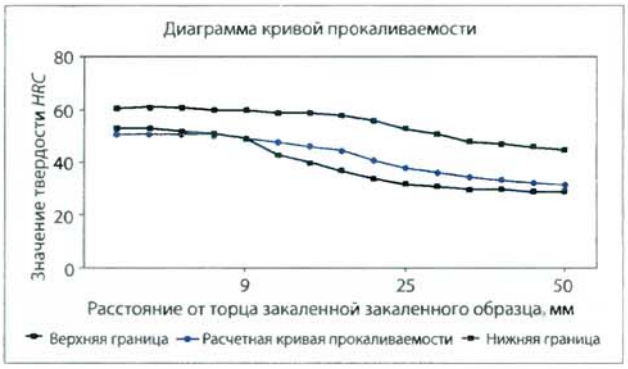

Рис. 7. **Отчет, формируемый программой**

расширить число пользователей такого инструмента благодаря доступности программы Excel для большинства компьютеров.

Программа характеризуется следующими функциями, которые могут дополняться в зависимости от потребности пользователей:

– возможность теоретического расчета полосы прокаливаемости по химическому составу стали (программа реализует функцию теоретического расчета кривой прокаливаемости по химическому составу стали на основе трех методик);

– сохраняет по средствам баз данных стандартные поля прокаливаемости из двенадцати стандартов и имеет возможность формировать и сохранять базу данных полей прокаливаемости заказчиков по фирменным спецификациям;

– обеспечивает вывод полученных результатов расчетов на печать, в виде специального отчета (пример отчета на рис. 7), в виде файла .xls, в виде файлов-рисунков;

– включает модуль для загрузки заводской базы данных по химическому составу произведенных плавок и быстрым вводом химического состав стали путем копирования строки;

– включает модуль для сохранения до 10 расчетов по различным методикам и сохранения полученной информации в файлы-рисунки, файл Excel. Функция позволяет подбирать химический состав стали, который обеспечивает теоретическую прокаливаемость по всем методикам расчета, что позволяет с большой вероятностью получить на практике положительные результаты по полосе прокаливаемости стали;

– программа имеет функцию автоматического подбора подходящей таблицы коэффициентов для методики SEP 1664 в зависимости от введенного химического состава стали.

Заключение. В результате реализации собственных разработок аналогичных программ на различных предприятиях отрасли можно значительно упростить и оптимизировать выполнение задач по проработке и внедрению технологических решений при освоении производства стали премиальных марок для автомобильной промышленности.

Библиографический список

1. Расчет прокаливаемости сталей / Блог Максима Тереньтева о металлургии [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: http://metallovedeniye.ru/modelirovanie/raschetprokalivaemosti-stalej.html – Дата доступа 27.09.2016.

2. **Лахтин Ю.М.** Основы металловедения. М. : Металлургия, 1988. 320 с.

3. **ГОСТ 5657–69.** Сталь. Метод испытания на прокаливаемость.

4. **DIN EN 10084:2008-06, EN 10084:2008 (D).** Стали для цементации. Технические условия поставки.

5. **EN 10083-3:2006 (D).** Стали для закаливания и отпуска. Ч. 1. Основные технические условия поставки для легированных сталей.

6. **EN 10083-2:2006 (D).** Стали для закаливания и отпуска. Ч. 2. Основные технические условия поставки для нелегированных сталей.

7. **ГОСТ 4543–71.** Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.

8. **ГОСТ 1050–2013.** Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия.

9. **SEP 1664:2004-06.** Вывод уравнений методом множественной регрессии для расчета прокаливаемости при испытании на термическую закалку по Джомини на основе химического состава сталей. Техническое правило.

10. **SAE J406.** Методы определения прокаливаемости стали. Стандарт.

11. **ASTM A255.** Стандартные методы испытаний для определения прокаливаемости стали. Стандарт.

DEVELOPMENT AND PRACTICAL USE OF ENGINEERING PROGRAM "STEEL HARDENABILITY"

© Vedybeda D.V.

Steelmaking division of Engineering department of OJSC «BSW – management company of «BMC» holding»

The article presents an overview and brief results of development of special program for calculating the hardenability band depending on steel chemical composition. This program is used by engineering and technical specialists of OJSC "BSW – management company of "BMC" holding".

The development of the program included several stages of work and was implemented on a «simple-to-complex» basis. Programming language C#, interface is built on the basis of Windows Forms. Design environment – Microsoft Visual Studio 2013 Professional. The program database was created using the design environment provided by the program for deploying and developing databases – Microsoft SQL Server 2008. Development time from 2016 to 2021, active development time from 2016 to 2019, the number of developers is one. At the moment only data from new steel standards with a requirement for hardenability band are entered into the program. The data is kept up to date.

Since 2018 to 202 another version of the program was developed with almost the same functions only in Microsoft Visual Basic design environment built into the Excel program, which has an open source code. This version is used in the plant for daily work.

Consequently, using our own resources, a software module was developed that includes several variants of theoretical calculations and a database that includes information from various technical standards. The program includes the ability to generate all kinds of reports and a block for data analysis.

Keywords: steel hardenability; computer program; calculations; standard; database.