

## ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ И МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ

Е. В. ШАПОВАЛОВ, В. В. ДОЛИНЕНКО, В. А. КОЛЯДА, Т. Г. СКУБА, Ф. С. КЛИЩАР

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua

В работе рассмотрены основные проблемы автоматизации процессов многопроходной сварки МИГ/МАГ крупногабаритных изделий во всех пространственных положениях в условиях низкой повторяемости сборочных операций. Показана необходимость и, в то же время, недостаточность использования с целью адаптации только одного лазерно-телевизионного сенсора. Предложена методика оснащения робототехнического (механизированного) сварочного комплекса средствами технического зрения в виде системы лазерно-телевизионного и видео-пирометрического сенсоров. Представлены результаты разработки технических средств, алгоритмического и программного обеспечения адаптивного сварочного комплекса. В предложенных алгоритмах управления используются результаты измерений геометрических параметров как разделки кромок стыкового соединения, так и положения расплавленной сварочной ванны в реальном масштабе времени. Показано, что адаптивная роботизированная система выполняет основные функции, возложенные на нее: корректировка положения электрода и параметров режима сварки в условиях возмущающих факторов, и способна обеспечить необходимые геометрические и механические характеристики сварного шва. В данной работе в качестве примера используется робототехнический комплекс фирмы «ABB», в состав которого входит сварочный робот «ABB IRB-1600», оснащенный лазерно-телевизионным и видео-пирометрическим сенсорами, и источник питания дуги «ESAB Aristo MIG 5000I». Сварочные эксперименты показали, что разработанное программное и аппаратное обеспечение позволяет выполнить адаптацию РТК для применения ее в процессе сварки стыковых соединений при действии возмущающих факторов, таких как: изменение величины зазора, искривление электродной проволоки, изменение температуры окружающей среды и др. Библиогр. 8, рис. 6.

*Ключевые слова:* сварочный робот, манипулятор, геометрическая и технологическая адаптация, система автоматического управления, интерфейс оператора

Применение серийно выпускаемых робототехнических комплексов (РТК) в автоматизированных системах управления дуговой сваркой крупногабаритных толстостенных изделий позволяет повысить производительность и гарантировать необходимый уровень качества формирования сварных соединений. Поэтому разработки, направленные на поиск возможностей применения серийно изготавливаемых механических многосвязных манипуляторов сварочной горелки и изделия для реализации концепции безлюдных сварочных технологий являются актуальными. Сдерживающими факторами применения РТК являются недостаточная точность повторения сборочных операций под сварку стыковых соединений. Это приводит к возникновению переменной величины зазора между кромками стыка и переменной геометрии всего стыкового соединения. Также в процессе сварки появляются дополнительные смещения в изделии, вызванные тепловыми деформациями и структурными превращениями в сварном шве, что в итоге затрудняет получение качественного сварного соединения.

Одним из способов устранения препятствий на пути широкого применения серийно выпускаемых РТК является оснащение их средствами техническо-

го зрения — лазерно-телевизионными и видео-пирометрическими сенсорами.

Основное задание лазерно-телевизионных сенсоров — бесконтактное измерение геометрических параметров стыкового соединения и передача их значений в систему управления РТК. Полученные данные используются не только для корректировки траектории перемещения сварочной горелки относительно оси стыка, но и для адаптивного управления сварочными параметрами, такими как напряжение сварки, скорость подачи проволоки, скорость сварки, амплитуда колебаний сварочной горелки. РТК, оснащенный лазерно-телевизионным сенсором, способен обеспечить необходимые геометрические параметры сварного шва и его механические свойства. Основным преимуществом оптических сенсоров перед тактильными датчиками является получение более полной информации о геометрии стыка, что позволяет разрабатывать более точные алгоритмы заполнения разделки кромок при многопроходной сварке. Однако оснащение роботов только лазерно-телевизионными сенсорами является недостаточным в условиях наличия возмущений, таких как изменение температуры окружающей среды, намагниченность изделий, искривления электрод-

ной проволоки, тепловая деформация стыка и так далее. Указанные факторы приводят либо к изменению глубины проплавления, либо к смещению сварочной дуги (сварочной ванны) на одну из кромок стыкового соединения, которое может быть причиной недостаточного проплавления другой кромки. С целью минимизации влияния указанных возмущений возникает необходимость оснащения роботов дополнительным сенсором для непосредственного слежения за сварочной ванной с целью оценивания размеров сварного шва и его положения в пространстве относительно оси стыка в режиме реального времени без транспортного запаздывания. Для этого был разработан и интегрирован в адаптивный робототехнический комплекс специализированный видео-пирометрический сенсор.

Проблеме создания систем адаптивного управления сваркой МИГ/МАГ в настоящее время уделяется большое внимание за рубежом [1–4]. Однако в полной мере задача не решена.

Данная статья посвящена разработке методики создания алгоритмического и программного обеспечения для контроллера «ABB IRC5» сварочного робота «ABB IRB-1600», оснащенного лазерно-телевизионным (ЛТС) и видео-пирометрическим сенсором (ВПС). ЛТС используется для измерения геометрических параметров стыковых соединений с разделкой кромок, а ВПС — для оценивания размеров и положения сварочной ванны (рис. 1).

Основными функциями программного обеспечения системы автоматического управления параметрами процесса сварки на основе информации от ЛТС есть следующие:

- управление перемещением сварочной горелки вдоль центра стыка на основе действитель-

ного положения текущего участка стыка в пространстве, которое вычисляется ЛТС в масштабе реального времени;

- управление формой и амплитудой колебаний горелки на основе текущих геометрических параметров стыка и, в частности, величины зазора перед горелкой;

- управление параметрами режима сварки (величина скорости подачи электродной проволоки, напряжения сварки, скорости сварки) на основе текущих геометрических параметров стыка перед горелкой относительно направления сварки. Алгоритм расчета значений этих параметров аналогичен предложенному в работе [5].

Программное обеспечение имеет два уровня управления процессом сварки: верхний и нижний.

Программное обеспечение верхнего уровня реализовано с использованием языка программирования C# в среде программирования MS Visual Studio. Программный код в виде файлов библиотек dll загружается в пульт оператора ABB FlexPendant» [6] (рис. 2).

Программное обеспечение нижнего уровня разработано на языке Rapid (ABB) в среде программирования ABB RobotStudio.

Разработанное программное обеспечение предназначено для работы под управлением операционной системы реального времени Windows CE.

Программное обеспечение реализовано в виде нескольких потоков, которые выполняются параллельно с использованием механизма программных прерываний:

- управление движением робота (перемещением сенсоров, закрепленных на последнем звене робота) по заранее спланированной траектории с учетом коррекции в реальном масштабе времени;



Рис. 1. Структурная схема параллельной двухсенсорной системы

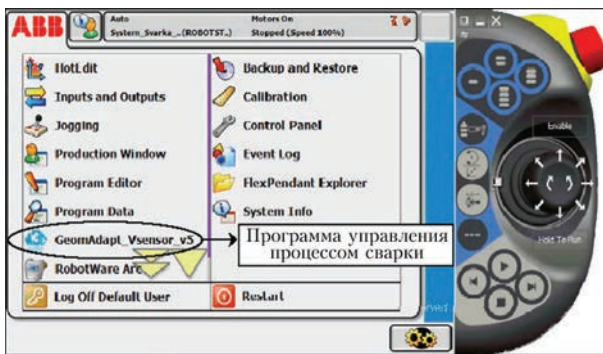


Рис. 2. Главное меню пульта оператора ABB FlexPendant

опрос контроллера робота с целью получения координат текущего положения ТСП (tool central point). Значение координаты  $X$  отвечает положению лазерной плоскости ЛТС в направлении сварки вдоль стыка;

опрос ЛТС в реальном масштабе времени и получение от него координат  $Y$  и  $Z$  точек пересечения секущей лазерной плоскости с кромками стыка;

опрос ВПС в масштабе реального времени с целью получения от него координат центра сварочной ванны и ее геометрических параметров;

расчет текущих значений параметров режима сварки и значений коррекции положения горелки (в поперечном направлении и по высоте относительно оси стыка) и передача этих значений контроллеру робота.

После загрузки в контроллер робота файлов библиотек dll, созданных в MS Visual Studio, в главном меню пульта кроме основных пунктов меню появляется пункт с названием программы управления процессом сварки, например, «GeomAdaptVsensor\_v5» (рис. 2).

При выборе оператором этого пункта меню запускается на выполнение программа управления процессом сварки (рис. 3). Значительную область диалогового окна интерфейса оператора занимает изображение контура лазерной полосы, которая динамически изменяется в процессе сканирования стыка перед началом и во время сварки.

В верхней части экрана находятся вкладки «Video» и «Info», которые содержат информацию о геометрических параметрах стыка, сварочной ванны и рассчитанных значениях коррекции траектории горелки, и вкладка «Trajectory», предназначенная для отображения стыка и траектории движения горелки. В левой части окна размещены элементы управления (кнопки) для выбора либо ручного («Correction manual»), либо автоматического режима коррекции («Correction auto») сварочной горелки. В нижней части размещены пункты меню «File» и «View».

Пункт меню «File» позволяет сохранить в файл реальную (с коррекцией) траекторию перемеще-



Рис. 3. Главное диалоговое окно интерфейса оператора на экране пульта ABB FlexPendant

ния горелки после выполнения сварки каждого шва. В результате можно получить паспорт изделия с отображением всей необходимой информации о траектории и режимах сварки на всех участках корневого и заполняющих швов свариваемого изделия.

Пункт меню «View» предоставляет возможность отражения на экране пульта оператора сетки с выбранным шагом и центральных осей, которые пересекаются в точке с координатами  $y = 0, z = 0$ . Таким образом, оператор имеет возможность визуально оценить величину смещения стыка и изменение его геометрии в процессе сварки.

В процессе сварки кроме измерения геометрических параметров стыка и его положения в пространстве также оценивается соответствующая информация о сварочной ванне, которая может отображаться на экране пульта оператора. Регистрация изображения теплового поля сварочной ванны и формирования оценки высоты сварочной ванны относительно нижней поверхности разделки стыка выполняется с помощью двухканального пирометрического сенсора. На основе данной информации системой управления РТК формируется коррекция положения электрода в процессе сварки и коррекция параметров режима сварки. На рис. 4 показано изображение теплового поля сварочной ванны в двух крайних положениях горелки, которая выполняет поперечные колебания.

Положение максимально нагретой зоны (области горения дуги) остается в средней части кадра, в то время как менее нагретая зона сварочной ванны периодически перемещается, что обусловлено поперечными колебаниями горелки. Неподвижное положение максимально нагретой зоны объясняется тем, что сенсор пирометра закреплен непосредственно на горелке и поэтому на изображении дуга является неподвижной, а контуры сварочной ванны перемещаются.

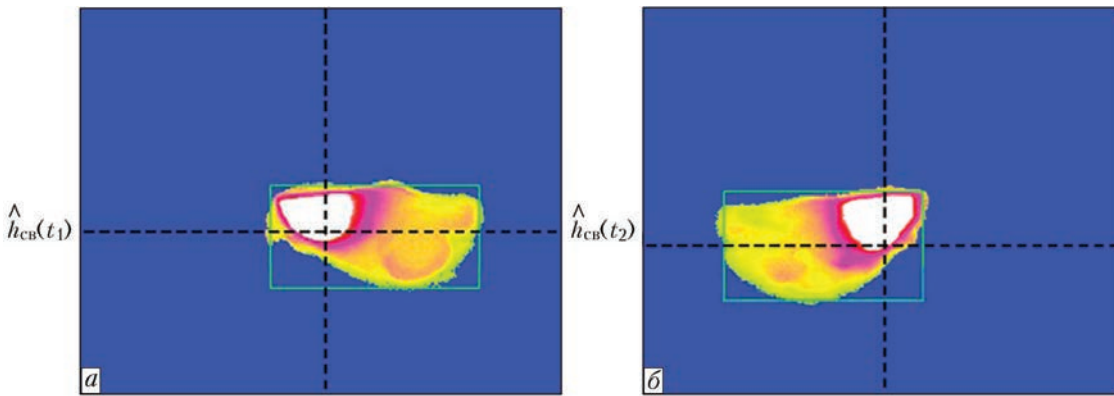


Рис. 4. Изображение теплового поля сварочной ванны при сварке корневого шва с поперечными колебаниями: а, б — крайнее левое и крайнее правое положение относительно оси стыка

Взаимодействие между контроллером сварочного робота, ЛТС и ВПС реализовано с помощью технологии пакетной передачи данных Ethernet на верхнем уровне программного обеспечения. Структура программного обеспечения для реализации взаимосвязей между компонентами системы представлена на рис. 5. При разработке программного обеспечения применялся язык программирования C# MS Visual Studio.

Основные функции, которые применяются при реализации программного обеспечения, имеют следующий вид:

- создание конечных точек по адресам сокетов и портов, которые соответствуют IP -адресам сенсоров;

- создание сокета TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol);
- привязываем точку к созданному сокету — `mysocket.Connect(ipер);`
- отправляем данные через сокет — `mysocket.SendTo();`

• ожидаем ответ от сенсоров — процедура `Listen()` формирует список полученных от сенсора координат характеристических точек контура лазерной полосы, по которым определяют геометрические параметры разделки кромок и зазора.

Для получения доступа к данным робота в формате языка программирования Rapid из программы C# подключаем рабочее пространство (namespace) `RapidDomain` [6]. В этом домене описываются PC SDK классы с разными типами дан-

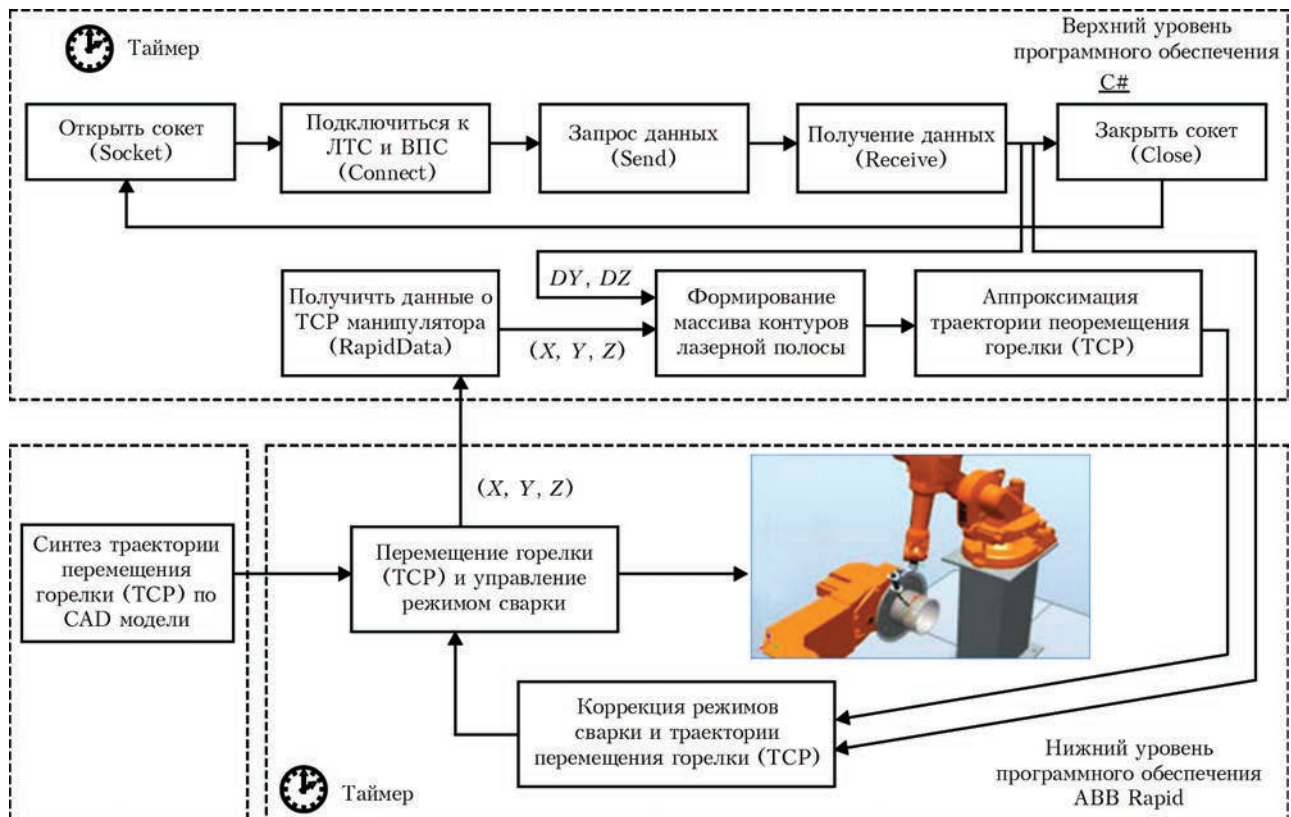


Рис. 5. Структурная схема программного обеспечения обмена информацией между компонентами системы

ных Rapid. Для чтения или записи RapidData создается RapidData-объект, который связывается с соответствующими данными.

Для передачи в программу нижнего уровня (Rapid) значений скорректированных координат сварочной горелки выполняются следующие шаги алгоритма:

- считывание текущих координат в масштабе реального времени;
- коррекция координат в соответствии с показаниями ЛТС и ВПС;
- передача скорректированных координат в контроллер сварочного робота.

Программное обеспечение нижнего уровня (ABB Rapid), предназначенное для реализации адаптивной коррекции горелки по вертикали и горизонтали в процессе сварки, имеет следующие основные структурные компоненты: основная процедура «main()», процедура заранее сформированной траектории «Path\_10» в соответствии с идеально собранным объектом сварки и процедура «TRAP Path\_10\_correct», которая учитывает погрешности во время изготовления разделки и операций сборки. Перед вызовом процедур объявляются переменные, например «hori\_id» и «vert\_id», которые подключаются к «correction generator» для выполнения горизонтальной и вертикальной коррекции.

Получение данных от программного обеспечения верхнего уровня выполняется с помощью механизма прерываний по таймеру. Сначала объявляется переменная «timeint» с типом данных «intnum» [7]. После чего переменная «timeint» с помощью функции CONNECT связывается с процедурой типа TRAP, которая в данном проекте имеет название «Path\_10\_correct». Кроме этого в этой процедуре включается таймер прерываний TTimeg, в параметрах которого указывается значение интервала времени между опросом сенсоров (например, 0,2 с, что равняется такту 5 Гц). В процедуре «Path\_10\_correct» выполняется коррекция значений координат целевой точки, в которую перемещается горелка в процессе сварки корневого шва, и коррекция параметров режима сварки.

Для записи смещения (в системе координат траектории) в correction generator применяется функция CorrWrite, которая приводит к немедленной коррекции координат целевой точки траектории (TorchPos) и, соответственно, траектории движения горелки к скорректированной точке. Функция ArcRefresh используется для обновления параметров режима сварки (adaptWd) в процессе выполнения программы [8]. Обновленные значения параметров сварки передаются к командам сварки «ArcX», что в соответствии со структурой программы отнесено к процеду-

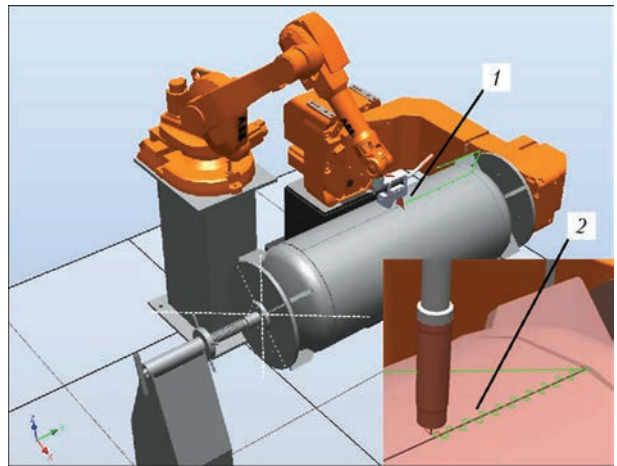


Рис. 6. Имитационная модель адаптивного робототехнического комплекса: 1 — траектория сканирования стыка перед сваркой; 2 — скорректированная траектория перемещения горелки (с колебаниями)

ре «Path\_10». Для реализации команды сварки вдоль линейной траектории применяется функция ArcL [8], первым параметром которой является целевая точка, значение координат которой постоянно корректируется по таймеру прерываний. Кроме этого, указывается скорость перемещения, значения параметров старта сварки adaptSm, значения параметров режима сварки, точность позиционирования fine, параметры рабочего инструмента MyNewTool\_Torch\_Esab и рабочего объекта Workobject\_truba. Последний параметр указывает на то, что целевая точка не является константой.

Для проверки корректности работы алгоритмического и программного обеспечения построена имитационная модель РТК (рис. 6). Модель позволяет воспроизвести основные конструктивные особенности комплекса: кинематику робота, позиционера изделия, их взаимное расположение, геометрию свариваемого изделия с разделкой кромок стыка, конструкцию сварочной горелки, лазерно-телевизионного и видео-пирометрического сенсоров. Также модель позволяет воссоздать все этапы технологического процесса, начиная от запуска программы управления на выполнение с помощью виртуального пульта оператора и заканчивая этапом перемещения горелки по скорректированной траектории вдоль оси стыка в реальном масштабе времени (рис. 6, поз. 2). Для этого реализованы следующие возможности: сканирование стыка с помощью ЛТС, формирование списка характерных точек проекции лазерной плоскости на стык и выполнение расчета траектории перемещения сварочной горелки с учетом коррекции.

## Выводы

1. Разработана методика создания алгоритмического и программного обеспечения подсистемы стабилизации геометрических параметров свароч-

ной ванны на основе информации от лазерно-телевизионного и видео-пирометрического сенсоров. Данная методика может быть использована для создания программного обеспечения адаптивных механизированных и роботизированных сварочных комплексов.

2. Предложен подход к разработке имитационной 3D модели, что позволяет воссоздать все этапы технологического процесса: сканирование стыкового соединения, планирование траектории перемещения сварочной горелки и непосредственное перемещение горелки с учетом коррекции по данным от лазерно-телевизионного и видео-пирометрического сенсоров. Разработанная модель может использоваться для оценки работы, как отдельных компонентов системы, так и работы комплекса в целом.

1. Гладков Э. А. Автоматизация сварочных процессов / Э. А. Гладков, В. Н. Бродягин, Р. А. Перковский. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 421 с.
2. Fernando de Aguiar Faria. Machine vision and artificial neural networks for seam tracking and weld inspection / Fernando de Aguiar Faria, Abraão Marques Tavares, Marina Spyer Las Casas // ABCM Symposium Series in Mechatronics. – 2010. – Vol. 4 – P. 768–775.
3. Research on a triline laser vision sensor for seam tracking in welding: Robotic welding, intelligence and automation / Zengwen Xiao, T.-J. Tarn et al. // LNEE. – 2010. – V. 88. – P. 139–144.
4. Moon H. S. Development of adaptive fill control for multitorch multipass submerged arc welding / H. S. Moon, R. J. Beattie // Int J Adv Manuf Technol. – 2002. – Vol. 19. – P. 867–872.
5. Алгоритм технологической адаптации для автоматизированной многопроходной МИГ/МАГ сварки изделий с переменной шириной разделки кромок / Т. Г. Скуба, В. В. Долиненко, В. А. Коляда, Е. В. Шаповалов // Автомат. сварка. – 2013 – № 1. – С. 16-22.
6. Robotics Application manual FlexPendant SDK RobotWare 5.15: Document ID: 3HAC036958-001 Revision: B. // ABB, 2013. – 220 p.
7. Robotics Technical reference manual, RAPID Instructions, Functions and Data types RobotWare 5.15.01, Document ID: 3HAC16581-1, Revision: P. // ABB, 2013. – 1336 p.
8. Robotics Application manual Arc and Arc Sensor RobotWare 5.15, Document ID: 3HAC16591-1, Revision: Q. // ABB, 2013. – 234 p.

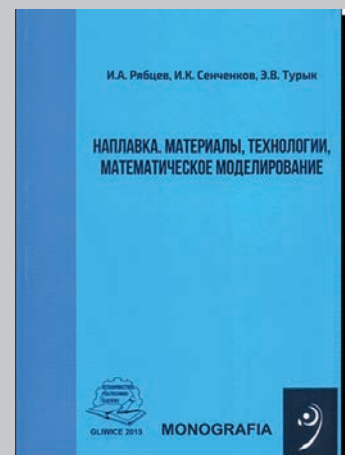
Поступила в редакцию 26.01.2016

#### НОВАЯ КНИГА

НАПЛАВКА. МАТЕРИАЛЫ. ТЕХНОЛОГИИ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. И. А. Рябцев, И. К. Сенченков, Э. В. Турък. – Gliwice, Wydawnictwo Politechnik Slaskiej, 2015. – 590 p.

#### Книга содержит следующие разделы:

- Виды износа и повреждения деталей машин и механизмов.
- Классификация и характеристика основных методов наплавки.
- Методы расчета напряженно-деформированного и структурного состояния деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации в условиях изнашивания и циклических механических или термомеханических нагрузок.
- Долговечность наплавленных деталей, эксплуатирующихся при изнашивании и циклических механических нагрузках.
- Долговечность наплавленных деталей, эксплуатирующихся в условиях изнашивания и циклических термических и механических нагрузок.
- Нелегированные и низколегированные стали, применяемые для изготовления деталей машин, и их свариваемость.
- Структура и свойства наплавленного металла различных систем легирования.
- Методы регулирования структуры наплавленного металла.
- Электродуговая наплавка.
- Плазменная наплавка.
- Электрошлаковая наплавка
- Газовая наплавка.
- Индукционная наплавка.
- Лазерная наплавка.
- Дефекты в наплавленном металле, их происхождение и меры борьбы с ними.
- Контроль качества и механическая обработка наплавленных деталей.
- Аттестация процедур наплавки.



С книгой можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е.О. Патона