

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор НИУ «МЭИ»

Драгунов В.К.



«21» июня 2019 г.

Программа аспирантуры

Направление: 15.06.01 «Машиностроение»

Направленность (специальность): 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
специальной дисциплины

«Сварка, родственные процессы и технологии»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ОД.2

Всего: 252 часа, в том числе:

Семестр 5, 144 часа в том числе

6 часов – контактная работа,
138 часов – самостоятельная работа

Семестр 6, 108 часов в том числе

6 часов – контактная работа,
66 часов – самостоятельная работа
36 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 15.06.01 Машиностроение, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 30 июля 2014 г. N 881 с изменениями и дополнениями от: 30 апреля 2015 г.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является формирование углубленных знаний о закономерностях образования неразъемных соединений материалов, металлургических и физических процессах в материалах при сварке, наплавке, пайке, нанесении покрытий, термической резке и других родственных процессах, разработке высокоэффективных ресурсосберегающих технологий соединения материалов, методах проектирования прочных и надежных сварных конструкций, сварочного оборудования, технологических и робототехнических комплексов для производства сварных изделий, методах управления параметрами технологических процессов для обеспечения стабильности качества и свойств сварных соединений, основных методах контроля качества получаемых изделий.

Задачами дисциплины являются:

- изучение металлургических и физических процессов при сварке, наплавке, пайке, нанесении покрытий, термической резке и других родственных технологических процессах, протекающих в металле во время и после обработки;
- изучение современных достижений и основных тенденций развития современных технологических процессов и оборудования сварочного производства, технологических и робототехнических комплексов для производства сварных изделий;
- изучение методов управления параметрами технологических процессов для обеспечения стабильности качества и свойств соединений;
- изучение методов математического моделирования и современных систем автоматизированного проектирования технологических процессов;
- приобретение навыков работы с современным технологическим оборудованием для сварки, резки, наплавки и других родственных процессов.

В процессе освоения дисциплины формируются следующие **компетенции**.

Универсальные компетенции:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3).

Общепрофессиональные компетенции:

- способность формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники (ОПК-2);
- способностью профессионально излагать результаты своих исследований и представлять их в виде научных публикаций, информационно-аналитических материалов и презентаций (ОПК-6).

Профессиональные компетенции:

- способность решать научно-технические исследовательские и производственные задачи в области сварки и родственных технологий (ПК-1);
- способность использовать инновационные идеи в области сварочной науки и техники в образовательном процессе (ПК-2);

- владение систематизированными профессиональными знаниями и навыками их применения в научных исследованиях в рамках своей специальности и смежных областей знания (ПК-3);
- владение методами математического и физического моделирования сварочных объектов, комплексов и систем (ПК-4);
- способность к критической оценке последствий новых научных достижений и разработки новых технических решений в рамках своей специальности (ПК-5);
- способность к системной оценке взаимного влияния процессов в технологических системах сварочного производства, системах управления и защиты технологических процессов сварки ПК-6.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут:

ЗНАТЬ:

- основные методы научно-исследовательской деятельности (УК-1);
- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях, методы научно-исследовательской деятельности (УК-3);
- области применения и методы решения задач математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера;
- цели и задачи научных исследований в области получения и обработки материалов, основные источники научно-технической информации в этих областях и требования к представлению информационных материалов (ОПК-6);
- основные способы познания, их эволюцию, основные понятия учебно-познавательной деятельности, универсальные учебные действия, необходимые для приобретения новых знаний и умений (ПК-3);
- методы построения математических моделей; прикладное программное обеспечение в виде современных математических пакетов (ПК-4);
- современное состояние науки в выбранной области (ПК-5);
- основные технологические системы сварочного производства (ПК-6);

УМЕТЬ:

- выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач (УК-1);
- анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (УК-3);
- использовать различные методы при решении задач математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники (ОПК-2);
- самостоятельно разрабатывать план работы, методы исследования и способы обработки полученных результатов, представлять в соответствующем виде полученные научные результаты (ОПК-6);
- объяснять необходимость использования тех или иных средств и методов познания в конкретных ситуациях выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач (ПК-3);
- разрабатывать математические модели для решения задач технологии, использовать прикладное программное обеспечение для решения задач технологии (ПК-4)
- выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах (ПК-5);

- объяснять критерии оценки взаимного влияния процессов в технологических системах сварочного производства (ПК-6);

ВЛАДЕТЬ:

- навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования (УК-1);

- навыками анализа основных мировоззренческих и методологических проблем, в т.ч. междисциплинарного характера возникающих в науке на современном этапе ее развития, владеть технологиями планирования профессиональной деятельности в сфере научных исследований (УК-3);

- навыками формулировки и решения нетиповых задач математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера (ОПК-2);

- системными знаниями в области получения и обработки материалов, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ в этих областях;

- знаниями основных предметных областей в рамках сварки (ОПК-6);

- знаниями об основных предметных областях в рамках сварки, системах управления и защиты технологических процессов сварки (ПК-3).

- методами множественного корреляционного и регрессионного анализа для построения математических моделей процессов и объектов (ПК-4);

- навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации (ПК-5);

знаниями об основных предметных областях в рамках сварки, системах управления и защиты технологических процессов сварки (ПК-6).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ НАПЛАВКИ-НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ, ПАЙКИ И СКЛЕИВАНИЯ

1. Общие сведения о сварке, сварных соединениях и швах

Физические основы сварочного производства. Классификация способов сварки. Образование соединений при сварке плавлением. Сварные соединения и швы. Условное изображение и обозначение сварных швов на чертежах. Структура и свойства сварного соединения. Строение сварного соединения при сварке доэфектоидной стали. Горячие и холодные трещины. Свариваемость сталей, влияние углерода на свариваемость.

2. Сварные конструкции: распределение напряжений, расчеты на прочность

Виды сварных соединений. Распределения напряжений в сварных соединениях: в стыковых швах, в лобовых швах, во фланговых швах. Расчет основных видов сварных соединений на статическую прочность. Расчет соединений работающих при переменных нагрузках. Расчет соединений работающих на изгиб и сложное сопротивление.

3. Оборудование для основных методов дуговой сварки

Электрические свойства дуги и ее характеристики. Ионизация дугового промежутка. Строение сварочной дуги. Возбуждение дугового разряда. Статическая вольт-амперная характеристика сварочной дуги. Сварочные свойства дуги. Влияние параметров сварочной дуги на размеры и формирование сварного шва. Источники питания сварочной дуги. Устойчивость горения дуги, внешняя характеристика источника питания. Особенности выбора характеристики источника питания. Основные параметры, классификация источников питания. Сварочные трансформаторы. Сварочные выпрямители. Сварочные генераторы. Современные инверторные источники питания.

4. Основные методы сварки плавлением

Ручная дуговая сварка. Схема процесса РДС. Электроды для РДС: сварочная проволока, покрытие; состав и назначение, маркировки. Структура условного обозначения электродов по ГОСТ 9466-75. Выбор параметров РДС. Особенности технологии РДС.

Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса. Схема процесса и особенности АДСФ. Сварочные флюсы: классификация, состав. Особенности выбора системы «флюс - сварочная проволока». Технология и оборудование для сварки под флюсом. Автоматическое регулирование длины дуги.

Дуговая сварка в защитных газах. Особенности дуговой сварки в защитных газах. Применяемые сварочные материалы: электроды и защитные газы. Аргонодуговая сварка (АрДС) плавящимся и неплавящимся электродом. Сварка в среде CO₂.

Электрошлаковая сварка. Схема и особенности Электрошлаковой сварки (ЭШС), область применения. Предварительная подготовка кромок и сборка стыка для ЭШС. Особенности сварки кольцевых швов. Применяемые сварочные материалы: флюсы, электроды.

Электронно-лучевая сварка. Схема и особенности электронно-лучевой сварки (ЭЛС), область применения. Оборудование. Техника ЭЛС. Влияние параметров электронного пучка на форму и размеры сварного шва.

Контактная сварка. Виды контактной сварки: стыковая, точечная, шовная. Схемы способов сварки, циклограммы технологических параметров процесса, применение.

5. Особенности технологии сварки сталей различных структурных классов.

Технология сварки конструкционных низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Марки сталей, маркировка, состав. Особенности технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами, сварки под слоем флюса, дуговой сварки в защитных газах: выбор способов, присадочных материалов, защитных газов, флюсов.

Технология сварки низколегированных теплоустойчивых сталей. Марки сталей, маркировка, состав, применение. Особенности технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами, сварки под слоем флюса, дуговой сварки в защитных газах: выбор способов, присадочных материалов, защитных газов, флюсов, режимов сварки.

Технология сварки хромоникелевых сталей аустенитного класса. Марки сталей, маркировка, состав, применение. Основные трудности сварки сталей аустенитного класса. Виды коррозии: общая коррозия, межкристаллитная коррозия, ножевая коррозия. Общие технологические условия сварки. Особенности технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами, сварки под слоем флюса, дуговой сварки в защитных газах: выбор способов, присадочных материалов, защитных газов, флюсов.

6. Особенности технологии сварки цветных металлов и их сплавов

Технология сварки алюминия и сплавов на его основе. Классификация сплавов на основе алюминия, применение. Металлургические особенности сварки алюминия. Изменение структуры и свойств металла шва и зоны термического влияния. Подготовка перед сваркой. Особенности различных способов сварки и применяемые сварочные материалы.

Технология сварки меди и сплавов на её основе. Медь и сплавы на основе меди: латуни, бронзы (обзор). Металлургические особенности сварки меди. Изменение структуры и свойств металла шва и зоны термического влияния. Подготовка перед сваркой. Особенности различных способов сварки и применяемые сварочные материалы.

КОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ ПОТОКИ ЭНЕРГИИ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИХ ГЕНЕРАЦИИ

1. Источники энергии термических процессов

Современное представление об источниках энергии при сварке и обработке материалов. Основные понятия и определения. Источники энергии для термических процессов. Сравнительная характеристика термических источников энергии.

2. Электродуговые источники энергии

Проводимость твердых тел, жидкостей и газов. Электрический разряд в газах. Строение электрической дуги. ВАХ дуги. Элементарные процессы в плазме дуги: термическая ионизация; потенциал ионизации; фотоионизация; деионизация; излучение плазмы; эффективный потенциал ионизации. Эмиссионные процессы на поверхности твердых тел: термоэлектронная эмиссия; эффект Шоттки; туннельные переходы; фотоэмиссия; вторичная эмиссия; пленочные катоды. Баланс энергии дуги. Магнитное поле дуги. Пинч-эффект. Влияние магнитного поля на дугу: Продольное и поперечное магнитное поле. Внешнее поперечное магнитное поле. Вращающаяся дуга. Бегущая дуга. Особенности дуги переменного тока. Вентильный эффект.

3. Электронно-лучевые источники энергии

Электронно-лучевые источники энергии. Оптико-механическая аналогия. Движение электронов в электростатическом поле. Движение электронов в магнитном поле. Ускорение электронов. Формула скорости. Аксиально-симметричное электростатическое поле. Основное уравнение электронной оптики. Аксиально-симметричное магнитное поле. Формирование электронного луча. Функциональная схема электронной пушки. Физические процессы, протекающие в пространстве дрейфа. Действие собственного пространственного заряда в электронных пучках. Изменение контура пучка введенного в эквипотенциальное пространство.

4. Световой луч и его свойства. Основы генерации лазерного излучения

Электромагнитный спектр. Математическое представление световых волн. Монохроматичность световой волны. Направленность светового луча. Собственный размер светового пучка. Радиометрия и фотометрия. Интерференция световых волн. Когерентность светового излучения. Интерферометр Фабри-Перо. Поляризация света. Виды поляризации. Преобразователи поляризации. Преобразователи круговой поляризации – волновые пластинки. Различные виды оптических линз.

Атомные переходы. Спонтанное и вынужденное излучение. Населенность энергетических уровней. Инверсия населенности. Двухуровневая накачка. Аммиачный мазер. Трех- и четырехуровневая схема накачки. Способы накачки лазеров. Однопроходный усилитель света. Оптический резонатор. Пороговые условия генерации. Формирование лазерного пучка в резонаторе. Уширение линий вынужденного излучения. Лазерные моды. Добротность резонатора. Продольно-поперечные моды лазера. Селекция линий излучения лазера. Одномодовый режим работы лазера. Модуляция добротности. Способы модуляции добротности. Синхронизация мод.

5. Технологические лазерные источники

Газовые лазеры. Атомарные лазеры. Конструкция He-Ne лазера. Атомарные лазеры на парах металлов. Лазеры на ионах инертных газов. Конструкция аргонового лазера. Лазеры на парах и ионах металлов. Молекулярные лазеры. CO₂-лазер. CO₂-лазер с диффузионным охлаждением. Лазеры с поперечной прокачкой. Газодинамические лазеры. Химические лазеры. Лазеры на самоограниченных переходах. Эксимерные лазеры. Твердотельные лазеры. Рубиновый лазер. Лазеры на стекле с неодимом. Лазеры на АИГ с неодимом. Типы полупроводников. Процессы p-n перехода. Параметры полупроводникового лазера. Конструкции полупроводниковых лазеров. Лазеры на красителях (жидкостные). Лазер с ламинарным потоком красителя.

6. Плазменные технологические источники энергии

Степень ионизации плазмы. Квазинейтральность. Температура плазмы. Плазменные струи в дуге. Плазменный дуговой разряд. Характеристики плазменного источника. Способ получения сжатой дуги. Виды плазменных источников энергии. Конструкция плазмотронов.

7. Концентрированные и неконцентрированные источники энергии

Концентрированные и неконцентрированные источники энергии. Основные закономерности взаимодействия концентрированных потоков энергии (электронный луч, луч лазера, струя низкотемпературной плазмы, сжатая электрическая дуга, ионные пучки) с твердым телом при осуществлении процессов сварки, резки, сверления, модифицирования.

8. Применение самоорганизующихся (синергетических) технологий сварки и обработки материалов

Самоорганизация процесса нагрева материалов. Синергетика. Перспективы использования в промышленности самоорганизующихся (синергетических) технологий сварки и обработки материалов.

Автоколебания температурного поля в зоне обработки КПЭ, динамика формирования глубокого канала в материале; физическое моделирование процесса нагрева твердого тела в автоколебательном режиме; схема типичной автоколебательной системы.

9. Процессы, протекающие при воздействии электронного луча на материалы

Физические процессы при воздействии КПЭ на материалы. Потери энергии в газовой и конденсированной средах; основные процессы взаимодействия потока энергии с веществом; характер теплового источника; условия перехода к взрывному вскипанию вещества; плавление, испарение и выброс продуктов разрушения из зоны обработки; вторичное излучение из мишени и эффективный КПД нагрева, коэффициент поглощения энергии материалом; термический КПД проплавления материала; взаимодействие электронного луча и лазерного излучения с плазмой в зоне обработки.

Гидродинамические процессы в зоне воздействия КПЭ на материалы, деформация поверхности жидкой фазы; формирование канала в материале; закономерности переноса (колебания) жидкого металла в канале проплавления; типичные дефекты формирования канала.

Закономерности сварки металлов больших толщин с глубоким проплавлением, связь удельной мощности источника с геометрическими характеристиками зоны проплавления; расчетное определение глубины и ширины сварного шва; зависимость термического КПД процесса нагрева от параметров сварки; оптимизация размеров зоны термического влияния сварного шва от тепловой эффективности процесса сварки.

Закономерности удаления вещества из зоны обработки при резке и сверлении материалов КПЭ, закономерности испарения и выброса конденсированной фазы из зоны обработки.

10. Процессы, протекающие при воздействии лазерного луча на материалы

Основные достоинства лазерного излучения, позволяющие использовать его в качестве концентрированного источника энергии. Принципы действия квантового генератора. Основные характеристики лазеров. Требования к промышленным технологическим лазерам. Схемы и конструкции технологических лазеров. Энергетические условия взаимодействия лазерного излучения при обработке материалов. Плазменные процессы при лазерной обработке.

Классификация способов лазерной сварки. Технологические особенности лазерной сварки.

Физические процессы образования сварного соединения при лазерной сварке материалов малых толщин. Физические процессы образования сварного соединения при лазерной сварке с глубоким проплавлением.

Особенности лазерного разделения материалов. Механизмы лазерного разделения материалов. Процесс резки механизмом испарения и механизмом плавления материала. Механизмы газолазерной резки металлов.

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ СВАРКИ

1. Оборудование и технологии обработки материалов электронным лучом

Классификация процессов и оборудования для термической электронно-лучевой обработки материалов. Основные тенденции развития электронно-лучевого технологического оборудования.

Физические основы генерации электронных пучков и конструктивные особенности технологических электронных пушек. Классификация способов формирования электронных пучков и управления их характеристиками. Электронные пушки с катодом прямого накала. Электронные пушки с катодом косвенного подогрева. Электронно-лучевые испарители.

Конструкции электронно-лучевых технологических установок: плавильные установки, установки для электронно-лучевой сварки, резки, перфорации и термообработки; установки для нанесения покрытий.

Системы электропитания электронно-лучевых технологических установок: характеристика нагрузки источников электропитания; источники питания с трансформаторами промышленной частоты; источники питания инверторного типа. Системы управления электронно-лучевых технологических установок.

Технологии ЭЛС. Расчетные модели определения параметров режима ЭЛС. Эффективность процесса ЭЛС.

2. Оборудование и технологии обработки материалов лазерным лучом

Классификация методов лазерной обработки. Конструктивные особенности используемых лазеров. Упрочнение поверхности лазерным излучением. Лазерное легирование и наплавка. Лазерная сварка материалов. Обработка отверстий лазерным излучением. Резка лазерным излучением. Лазерное скрайбирование и термораскалывание.

3. Оборудование и технологии обработки материалов плазменной дугой

Плазменная резка. Сварка плазменной дугой. Плазменная наплавка. Плазменное напыление. Оборудование, применяемое для обработки материалов плазменной дугой.

ТЕПЛОВЫЕ И ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

1. Основные понятия, законы и допущения, принимаемые в расчетах тепловых процессов при обработке материалов.

Основные теплофизические величины и понятия. Закон теплопроводности (закон Фурье). Поверхностная теплоотдача. Схемы нагреваемого тела и источников теплоты. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Начальные и граничные условия. Основные понятия и законы расчета, применяемые при использовании распределенного объемного источника теплоты. Метод источников. Принцип наложения. Этапы изменения температуры при действии различных источников теплоты. Распространение теплоты от неподвижного мгновенного источника (точечный, линейный, плоский). Распространение теплоты от неподвижного непрерывно действующего источника теплоты постоянной мощности. Этап теплонасыщения. Этап предельного состояния. Этап выравнивания температуры.

Распространение теплоты от движущихся источников теплоты постоянной мощности. Этап предельного состояния. Этап теплонасыщения. Этап выравнивания температуры.

Распространение теплоты от мощного быстродвижущегося источника теплоты и расчет основных характеристик термического цикла. Расчет приращения температуры в точке при действии мощного быстродвижущегося источника тепла (МБИТ). Расчет длины расплавленной ванны. Расчет максимальной температуры в точке тела. Расчет мгновенной

скорости охлаждения. Расчет ширины зоны, нагретой выше заданной температуры. Расчет длительности пребывания металла выше заданной температуры.

Точечный источник теплоты на поверхности толстой пластины (плоского слоя). Влияние ограниченности размеров тела на процесс распространения теплоты. Определение приращения температуры от точечного источника теплоты, действующего на поверхности толстой пластины (плоского слоя). Учет влияния ограниченности размеров тела на процесс распространения теплоты.

2. Термдеформационные процессы при сварке

Понятие о термдеформационном цикле. Термдеформационные процессы в металлах, возникающие при воздействии на них сварочных источников теплоты. Изменение прочности материалов в области высоких температур. Распределение временных напряжений и деформаций при сварке пластин. Остаточные напряжения, возникающие при сварке материалов, не испытывающих полиморфных превращений. Остаточные напряжения, возникающие при сварке закаливающихся сталей. Остаточные напряжения при сварке закаливающихся сталей аустенитным швом. Порядок расчета деформаций и напряжений по методу Трочуна И.П.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

1. Физико-химические и металлургические процессы при обработке КПЭ

Взаимодействие обрабатываемого материала с окружающей средой. Обозначения, основные определения и законы. Кипение расплавов при сварке. Испарение. Равновесие при фазовых превращениях чистых веществ. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Равновесие между конденсированным раствором и паром. Уравнение Рауля. Испарение элементов из бинарных сплавов. Активность и летучесть. Состав пара над раствором. 1-й закон Коновалова Д.П. Испарение элементов из многокомпонентных сплавов. Порядок расчета состава пара над жидким сплавом. Диффузионные процессы в зоне обработки и их влияние на свойства сварных соединений. Закон распределения вещества в несмешивающихся жидкостях (закон Нернста). Шлаковая фаза. Свойства и состав шлаков. Взаимодействие материала с кислородом, азотом, водородом, сложными газами в процессе обработки КПЭ.

2. Сварочная ванна, кристаллизация металла при сварке и формирование первичной структуры металла шва

Особенности кристаллизации металла сварочной ванны. Схемы кристаллизации сварочной ванны. Влияние режимов сварки и условий кристаллизации на формирование первичной структуры и образование химической неоднородности металла шва. Изменению пластичности и прочности металлов и сплавов при высоких температурах. Закономерности образования горячих трещин. Методы испытаний на сопротивляемость сплавов образованию горячих трещин. Способы повышения сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин.

3. Фазовые и структурные превращения в металлах при обработке КПЭ. Стабильность размеров и формы сварных конструкций

Особенности фазовых и структурных превращений в металле сварных соединений. Причины образования трещин на этапе структурных и фазовых превращений (холодные трещины, трещины повторного нагрева и др.). Методы испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке. Способы повышения сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин. Размерная нестабильность сварных конструкций. Факторы, определяющие размерную нестабильность. Методы стабилизации структуры, формы и размеров сварных конструкций.

СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Деформации и напряжения, вызываемые процессами сварки, наплавки и нанесения покрытий. Концентрация напряжений в сварных соединениях. Влияние дефектов на механические свойства сварных соединений и их работоспособность.

Остаточные напряжения в сварных соединениях. Деформации, напряжения и перемещения в элементах сварных конструкций, экспериментальные и расчетные методы их определения. Методы снижения напряжений и деформаций при сварке и наплавке.

Прочность сварных соединений при статических нагрузках. Прочность при переменных нагрузках. Причины хрупких разрушений сварных конструкций.

Принципы расчета и проектирования сварных соединений и конструкций. Применение компьютерной техники в расчетах и проектировании металлоконструкций. Влияние технологии изготовления балок на их несущую способность.

Напряженное состояние узлов ферм. Влияние технологии изготовления решетчатых конструкций на их служебные характеристики.

Напряжения и деформации в листовых конструкциях. Особенности конструкции котлов и сосудов, их напряженное состояние. Основы расчета и проектирования труб и трубопроводов. Требования и технологии изготовления емкостей и труб.

Специфика сварных деталей машин. Принципы проектирования сварных конструкций из цветных металлов и пластмасс.

Методы повышения сварных конструкций при переменных нагрузках. Прочность сварных соединений при высоких и низких температурах. Вероятностные методы оценки прочности сварных конструкций.

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ, ПАЙКИ И СКЛЕИВАНИЯ

1. Технология наплавки и нанесения покрытий плавлением.

Технология наплавки покрытыми электродами. Технология автоматической и механизированной наплавки и нанесения покрытий. Технология наплавки. Формирование свойств наплавленного металла, метода его легирования.

Технология электрошлаковой наплавки конструкций из углеродистых и легированных сталей. Технология электрошлаковой сварки легких и цветных металлов и сплавов.

2. Технология холодной, ультразвуковой сварки, сварки взрывом и трением.

Технология сварки токами высокой частоты. Технология и области применения холодной сварки. Технология и области применения ультразвуковой сварки. Технология сварки взрывом крупногабаритных листов. Технология сварки трением. Технология сварки пластмасс.

3. Технология газопламенного и детонационного нанесения покрытий.

Основные операции дуговой металлизации и плазменного напыления. Техника и технология вакуумных покрытий.

4. Технология пайки металлов.

Пайка металлов. Теоретические основы пайки металлов. Сущность процесса пайки металлов. Физические процессы при пайке. Диффузионное и химическое взаимодействие припоя с паяемым металлом. Способы удаления поверхностных пленок и восстановление окислов при пайке.

Припой. Классификация припоев по химическому составу, температуре плавления и механическим свойствам. Наиболее распространенные группы припоев.

Флюсы. Назначение и требования к флюсам. Виды флюсов и их классификация. Типы паянных соединений. Расчет прочности паянных соединений. Технология пайки различных металлов и сплавов. Методы контроля паянных соединений.

5. Технология склеивания металлов и пластмасс.

Современное представление о механизме процесса склеивания. Классификация клеев. Наиболее распространенные клеи на основе термореактивных и термопластичных полимеров. Преимущества и недостатки клеевых соединений. Основные операции технологического процесса склеивания металлов. Прочность соединений. Принципы конструирования клеевых конструкций. Клееварные конструкции. Методы контроля клеевых соединений.

СВАРНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

1. Физико-химические процессы при сварке разнородных металлов

Эффективность использования сварных соединений разнородных металлов и сплавов. Классификация комбинированных конструкций. Примеры применения конструкций из разнородных металлов и сплавов. Особенности формирования сварных соединений разнородных металлов. Физико-химические основы сварки металлов. Сварка давлением, сварка плавлением (наплавка и сварко-пайка), пайка разнородных металлов. Физическая и технологическая свариваемость металлов. Особенности формирования сварных соединений разнородных металлов. Тепловые процессы при сварке разнородных материалов.

Взаимная растворимость металлов в твердом и жидком состояниях. Общие правила относительной предельной растворимости первичных твердых растворов. электроотрицательность атома. Размерный фактор и фактор электроотрицательности для предсказания характера растворимости.

Анализ структурно-фазового состояния и прогнозирование свойств сварных соединений разнородных металлов с помощью диаграмм состояния. Сварные соединения металлов, образующих непрерывный ряд твердых растворов. Сварные соединения металлов, имеющих ограниченную растворимость в твердом состоянии и образующих эвтектические смеси.

Анализ структурно-фазового состояния и прогнозирование свойств сварных соединений разнородных металлов с помощью диаграмм состояния. Сварные соединения металлов, не растворимых в твердом состоянии и образующих механические смеси. Сварные соединения металлов, образующих химические соединения. Прогноз возможности сварки разнородных металлов по диаграммам состояния.

Основные понятия, определения и закономерности диффузии. 1-ый и 2-ой законы Фика. Решение дифференциальных уравнений концентрационной диффузии. Диффузия в бесконечном стержне из разнородных материалов. Диффузия от непостоянного плоского источника в бесконечном стержне. Диффузия от цилиндрического линейного источника в бесконечной пластине. Диффузия от непостоянного шарового точечного источника. Энергия активации. Коэффициент диффузии. Диффузия в железе элементов, образующих твердые растворы внедрения. Диффузия углерода, азота, бора, водорода и кислорода в железе. Диффузия в железе элементов, образующих твердые растворы замещения. Эффект Киркендалла. Параметры диффузии легирующих элементов в аустените многокомпонентных сплавов железа.

Диффузия при взаимодействии твердой и жидкой фаз в процессе сварки. Равновесные коэффициенты ликвации элементов в железе. Коэффициенты диффузии некоторых элементов в жидком железе. Растворение при взаимодействии твердой и жидкой фаз в процессе сварки. Скорость переноса массы твердого вещества через поверхность контакта твердого и жидкого металла. Параметры диффузии некоторых элементов в жидком металле.

Поверхностные явления при сварке различных пар материалов. Межфазная поверхность. Поверхностное натяжение. Адгезия. Адсорбция. Капиллярные явления. Растеканность жидкости. Краевой угол смачивания. Уравнение Юнга. Процессы смачивания для различных пар металлов (примеры).

Электромагнитные и термоэлектрические эффекты при сварке разнородных материалов. Источники магнитных полей при сварке разнородных металлов и их влияние на

параметры источника теплоты. Изменение пространственных параметров электронного пучка при сварке разнородных материалов. Способы, снижающие степень воздействия магнитных полей на источник теплоты. Размагничивание деталей перед сваркой. Использование экранов из магнитомягких материалов с высокой магнитной проницаемостью для транспортировки пучка от анода пушки до поверхности изделия. Компенсация тока в зоне сварки. Введение в зону сварки дополнительных материалов. Ориентация пучка в направлении, противоположном отклонению.

2. Формирование сварных соединений при сварке разнородных материалов

Строение зоны сплавления сварных соединений разнородных металлов. Определение степени проплавления и состава металла шва при наплавке, однопроводной сварке с и без присадочных материалов. Структурная неоднородность металла сварных соединений разнородных сталей. Диаграмма Шеффлера.

Диффузионные процессы в зоне сплавления разнородных металлов и сплавов. Диффузионные прослойки. Механизм и кинетика образования и роста карбидных и интерметаллических фаз. Образование диффузионных прослоек в зоне сплавления разнородных сталей и определение их размеров.

Образование и рост интерметаллических прослоек в сварных соединениях разнородных металлов. Температурно-временная зависимость появления интерметаллидов. Изменение толщины общей интерметаллической прослойки в сварных соединениях разнородных металлов в зависимости от температуры и времени нагрева. Условие получения качественных соединений разнородных металлов сваркой давлением.

Кристаллизационные прослойки. Образование мартенситных прослоек в металле шва при сварке разнородных сталей. Влияние состава аустенитного шва на ширину прослоек. Влияние режимов сварки и технологических факторов на формирование мартенситных прослоек.

Остаточные напряжения в типовых комбинированных конструкциях. Понятие о сварочных деформациях и напряжениях. Закономерности развития остаточных напряжений в комбинированных конструкциях. Эпюры остаточных напряжений после сварки «однородных» пластин, разнородных пластин аустенитным швом, разнородных пластин с образованием в шве закалочных структур. Перераспределение остаточных напряжений после термической обработки.

3. Сварные комбинированные конструкции из сталей разных структурных классов

Способы сварки разнородных металлов. Соединение разнородных металлов в твердом состоянии. Основные виды сварки давлением. Соединение разнородных металлов сваркой плавлением и наплавкой. Источники для сварки: зависимые (типа дуги прямого действия) и независимые (типа косвенной дуги, электронного пучка и т.п.). Технологические приемы сварки разнородных материалов. Расплавление соединяемых кромок. Расплавление более легкоплавкого из соединяемых металлов (сварка – пайка). Расплавление более легкоплавкого металла и нанесение покрытий на поверхность более тугоплавкого. Применение металлических вставок. Переходные соединения (переходники). Наплавка на свариваемые кромки промежуточного металла (облицовка кромок). Сварка разнородных сталей. Выбор материалов и технологии изготовления комбинированных сварных конструкций из разнородных сталей.

Сварные соединения сталей одного структурного класса. Соединения перлитных сталей. Соединение высокохромистых сталей. Соединения высокохромистых ферритных сталей с феррито-аустенитными. Соединения аустенитных и феррито-аустенитных сталей.

Сварные соединения сталей разных структурных классов. Сварка перлитных сталей с мартенситными и мартенсито-ферритными сталями. Сварка аустенитных и аустенито-ферритных сталей с перлитными, мартенситными и мартенсито-ферритными сталями. Оптимальный состав металла шва сварных соединений. Наплавка аустенитных сталей на стали перлитного класса. Технология плазменной наплавки. Выбор режимов наплавки.

Состав и структура наплавов. Химическая и структурная неоднородности в зоне сплавления разнородных сталей.

4. Сварные комбинированные конструкции из сталей и цветных металлов и сплавов на их основе

Технология сварки сталей с медью. Особенности взаимодействия меди и стали при сварке. Особенности технологии сварки. Сварка сталей с алюминием и его сплавами. Сварка с нанесением покрытия на сталь. Сварка с использованием биметаллических переходников. Сварка сталей с титаном и его сплавами. Сварка сталей с ниобием.

Технология сварки алюминия с медью. Пути повышения прочности сварных соединений дополнительное механическое упрочнение медно-алюминиевого сварного соединения, содержащего значительный процент меди. Ограничение или исключение перехода меди в медно-алюминиевое соединение. Введение в шов при его формировании легирующих присадок и модификаторов с целью активного воздействия на процесс кристаллизации. Влияние различных факторов на содержание меди в металле шва и свойства соединений.

Технология сварки биметаллов. Рекомендации по сварке биметалла. Соединения, в которых отсутствует металлическая связь между швом основного и плакирующего слоя. Соединение с разделительным слоем из специального сплава. Соединения, выполненные сваркой и наплавкой, отличающиеся наличием металлической связи между швом и наплавкой. Соединения, в которых отсутствует металлическая связь между швом основного и плакирующего слоя. Комбинации металлов, соединение электронно-лучевой и лазерной сваркой.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

1. Классификация методов математического моделирования, применяемых при изучении сварочных процессов

Понятие математического моделирования. Место вычислительного эксперимента в структуре научно-исследовательской работы. Связь вычислительного и лабораторного эксперимента. Физическая и знаковая модель. Математические модели и их классификация. Структурированное представление процессов, протекающих при сварке материалов плавлением. Примеры применения компьютерных моделей для анализа различных процессов при сварке.

2. Применение дифференциальных уравнений второго порядка для описания сварочных процессов

Роль дифференциальных уравнений в физике. Классификация дифференциальных уравнений второго порядка. Эллиптические, параболические и гиперболические уравнения. Применение дифференциальных уравнений для описания процессов при сварке. Понятие краевой задачи. Начальные и граничные условия и их классификация.

3. Моделирование сварочных источников теплоты

Источник теплоты в математической постановке краевой задачи. Задание в виде граничного условия или объемного распределения плотности теплового потока. Современные подходы к моделированию сварочных источников теплоты.

4. Методы численного решения краевых задач

Методы аппроксимации дифференциальных операторов для приближенного численного решения краевых задач. Решение одномерной нестационарной задачи. Явная и неявная разностные схемы. Решение двумерного уравнения теплопроводности методом последовательного приближения. Методы переменных направлений и мелких шагов. Решение трехмерных краевых задач.

5. Методы моделирования случайных процессов

Применение методов теории вероятности для решения задач преобразования энергии при сварке. Случайные величины, дисперсия и математическое ожидание. Метод Монте-Карло. Моделирование процессов взаимодействия потоков частиц со средами. Плазменные процессы при сварке. Перспективы применения методов Монте-Карло для моделирования гидродинамических и газодинамических явлений в сложных системах. Моделирование процессов в кристаллах.

6. Основные подходы к моделированию процессов массопереноса при сварке

Методы сплошной среды и SPH-методы для анализа процессов массопереноса. Основные понятия методов сплошной среды. Поле скоростей. Эйлеровская и Ньютоновская жидкости. Уравнения Навье-Стокса. Методы крупных частиц и SPH-методы. Понятие о потенциале взаимодействия крупных частиц.

7. Методы верификации моделей сварочных процессов

Верификация и адекватность модели. Условность понятия «адекватность». Инженерный эксперимент как метод верификации математической модели. Датчики и преобразователи, применяемые для экспериментального исследования сварочных процессов. Обработка результатов измерений и автоматизация эксперимента. Итерационный подход к уточнению математической модели в процессе исследования.

САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Принципы и задачи проектирования. Уровни, аспекты и этапы проектирования. Типовые проектные процедуры.

Математическое обеспечение автоматизированного проектирования. Математические модели. Постановки и подходы к решению задач анализа. Постановки и подходы к решению задач синтеза.

Общая концепция сквозного конструкторско-технологического проектирования на базе компьютерных технологий. Взаимосвязь этапов проектирования, технологической подготовки, изготовления и эксплуатации сварной конструкции.

Назначение и методы моделирования процессов, протекающих в металле. Метод конечных элементов для решения уравнений.

Моделирование физических процессов в металлах при сварке в целях оценки показателей свариваемости и выбора режимов сварки. Алгоритм компьютерной программы расчета показателей свариваемости легированных сталей. Модели для расчета тепловых полей, структуры металла, концентрации диффузионного водорода и уровня напряжений при сварке

Общие вопросы автоматизации проектирования сварочной технологии. Обработка и представление исходных данных. Формирование последовательности сборки и сварки конструкции. Формирование маршрутной и операционной технологии изготовления отдельной сборочной единицы.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Технологические и конструктивные меры повышения качества сварки, наплавки и нанесения покрытий, способы их обеспечения и контроля. Дефекты и уровни дефектности сварных соединений.

Классификация методов контроля качества сварки, наплавки и нанесения покрытий. Методы неразрушающего контроля качества металлов, швов, наплавки и покрытий.

Физические основы и разновидности магнитных и электромагнитных методов контроля, техника и технология их применения.

Основы и классификация радиационных методов контроля. Источники рентгеновского и гамма-излучения, их конструкции, аппаратура и приспособления для управления. Радиографический контроль. Методы дозиметрии и обеспечения безопасности.

Физические основы, классификация ультразвуковых методов контроля. Приборы и оптимальные параметры ультразвукового контроля. Технология ультразвукового контроля, методы измерения дефектов.

Принципы, классификация и технология капиллярных методов контроля.

Методы контроля непроницаемости. Течеискатели.

Механические испытания качества сварки, наплавки и нанесения покрытий. Металлография, химический анализ и коррозионные испытания сварных соединений, наплавки и покрытий.

Основные понятия статистического управления качеством. Вероятностные схемы-модели оценки качества сварки, наплавки и нанесения покрытия, статистическое регулирование качества. Методы организации и управления качеством технологических сварочных процессов.

КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

1. Основные понятия и определения в области контроля и автоматизации обработки КПЭ

Контроль и автоматизация технологических процессов как средство интенсификации производства и повышения качества продукции. Задачи контроля и автоматизации. Структура систем контроля и управления: датчики, исполнительные элементы, вычислительные устройства. Понятие о визуализации и протоколировании технологических процессов. Возможности измерения электрических и технологических величин, косвенные измерения, управление по косвенным параметрам.

2. Исполнительные устройства систем автоматического управления

Области применения и основные характеристики преобразователей напряжения и частоты, исполнительных электроприводов постоянного и переменного тока, шаговых приводов, электрогидравлических приводов. Многокоординатные приводы, системы позиционирования рабочего органа.

3. Контроль и автоматизация дуговых технологических установок

Электрическая дуга как объект управления. Условия устойчивости дуги. Требования к характеристикам источников питания дуговых установок. Способы регулирования тепловыделения в дуге. Задачи и алгоритмы контроля и управления дуговыми сварочными и плавильными процессами.

4. Контроль и автоматизация электронно-лучевых и лазерных технологических установок

Электронно-лучевые установки (ЭЛУ) как объекты управления. Источники анодного питания, защита от перенапряжений и технологических коротких замыканий. Управление мощностью электронного пучка, отклонением и разверткой в ЭЛУ различного назначения (плавильных, для сварки и размерной обработки). Комплексное управление ЭЛУ с применением компьютерных и микропроцессорных средств. Задачи и алгоритмы управления сварочными, плавильными и испарительными ЭЛУ. Примеры. Управление технологическим процессом непрерывного нанесения процесса на рулонный материал.

Особенности контроля и автоматизации лазерных технологических процессов. Адаптивные системы управления лазерными установками. Источники питания твердотельных и газовых лазеров.

5. Контроль и автоматизация плазменных технологических установок

Устойчивость плазменной дуги, требования к источникам питания плазменных технологических установок. Задачи и алгоритмы контроля и управления промышленными плазмотронами. Особенности управления вакуумными плазменными установками с полым катодом. Характеристики разряда с полым катодом.

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины: экзамен

Вопросы для самоконтроля и для проведения экзамена:

1. Классификация процессов сварки. Требования к источникам энергии для сварки.
2. Электрическая сварочная дуга, ее виды и области применения.
3. Процессы в приэлектродных областях сварочной дуги и баланс их энергии. Перенос металла в дуге.
4. Общие условия устойчивости электрической дуги. Саморегулирование дуги с плавящимся электродом.
5. Действие магнитных полей на дугу, способы магнитного управления сварочной дугой.
6. Металлургические процессы при сварке. Взаимодействие металлов при сварке.
7. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Характеристики сварочных источников теплоты и их моделей.
8. Расчет температурных полей при сварке и наплавке численными методами.
9. Тепловая эффективность процесса сварки. Нагрев и плавление присадочного металла при дуговых и лучевых способах сварки.
10. Кристаллизация металла шва. Природа химической и физической неоднородности сварного соединения.
11. Горячие трещины при сварке. Методы оценки сопротивляемости металлов образованию горячих трещин.
12. Природа холодных трещин при сварке. Методы оценки сопротивляемости металлов образованию холодных трещин.
13. Технологические особенности дуговых процессов сварки.
14. Технологические особенности электрошлаковой сварки.
15. Достоинства и недостатки сварки электронным и лазерным лучами.
16. Дефекты сварных соединений. Типичные дефекты и их классификация.
17. Сварочные материалы. Назначение сварочных материалов.
18. Расчет режимов и размеров шва при дуговых способах сварки. Расчетная оценка ожидаемых механических свойств металла шва.
19. Технологические требования к оборудованию и источникам питания для сварки плавлением.
20. Современные источники питания для дуговой и электрошлаковой сварки и наплавки.
21. Сварочные и сборочно-сварочные технологические приспособления.
22. Особенности сварки низкоуглеродистых, низколегированных и среднелегированных конструкционных сталей.
23. Особенности сварки высоколегированных сталей и сплавов мартенситного, ферритного и аустенитного класса.
24. Обеспечение сварки разнородных сталей одного структурного класса и разного структурного класса.
25. Особенности сварки чугуна.

26. Обеспечение сварки меди и её сплавов, алюминия, магния и их сплавов, никеля и его сплавов, титана и его сплавов.
27. Особенности сварки тугоплавких и химически активных металлов (цирконий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам и др.).
28. Технология наплавки. Формирование свойств наплавленного металла. Методы легирования. Особенности технологии и техники наплавки. Сущность и техника особых способов наплавки.
29. Условия формирования соединений при точечной и шовной контактной сварке.
30. Условия формирования соединений при стыковой контактной сварке.
31. Общая схема контактных машин. Электрическая схема получения сварочного тока.
32. Классификация систем управления процессами точечной и шовной контактной сварки.
33. Управление процессом стыковой контактной сварки.
34. Сварка токами высокой частоты.
35. Виды сварных соединений. Концентрация напряжений в сварных соединениях.
36. Деформации и напряжения, вызываемые процессом сварки. Остаточные напряжения в сварных соединениях.
37. Численное моделирование деформаций и напряжений в элементах сварных конструкций.
38. Методы снижения напряжений и деформаций при сварке.
39. Особенности конструкций котлов и сосудов, их напряженное состояние. Основы расчета и проектирования труб и трубопроводов.
40. Физическая сущность, параметры, технологические возможности, технология и оборудование холодной, диффузионной сварки, сварки трением, сварки трением с перемешиванием, прокаткой.
41. Физическая сущность, параметры, технологические возможности, технология и оборудование сварки взрывом,
42. Физическая сущность, параметры, технологические возможности, технология и оборудование сварки электронным лучом.
43. Физическая сущность, параметры, технологические возможности, технология и оборудование сварки лазером.
44. Природа образования соединения при пайке. Классификация методов. Припой.
45. Конструирование паяных соединений. Оборудование для пайки.
46. Требования к форме внешних характеристик источников питания.
47. Техничко-экономические показатели источников сварочного тока.
48. Технологические и конструктивные факторы качества сварки и их контроль.
49. Дефекты и уровни дефектности сварных швов. Методы контроля качества, соединений.
50. Элементы и структурные схемы основных систем регулирования сварочных процессов.
51. Схема современных регуляторов режима дуговой сварки.

Критерии оценки за освоение дисциплины определены в Инструктивном письме И-23 от 14 мая 2012 г.

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Бурмистров, Е. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте. Учебник / Е. Бурмистров. – М.: Лань, 2017 - 552 с.
2. Гладков, Э.А. Автоматизация сварочных процессов / Э.А. Гладков, В.Н. Бродягин, Р.А. Перковский - Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 424 с.

3. Зорин, Е.Е. Лабораторный практикум. Электродуговая, контактная сварка и контроль качества сварных соединений. Учебное пособие / Е.Е. Зорин. – М.: "Лань", 2018. – 160 с.
4. Зорин, Н. Материаловедение сварки. Сварка плавлением. Учебное пособие / Н.Е. Зорин, Е.Е. Зорин. – "Лань", 2018. – 164 с.
5. Конюшков, Г.В. Специальные методы сварки плавлением в электронике. / Конюшков Г.В., Конюшков В.Г., Авагян В.Ш. - М.: Дашков и К, 2017. — 144 с.
6. Куликов В. Технология сварки плавлением и термической резки. Учебник / В. Куликов. - М.: Инфра-М, Мн.: Новое знание, 2016. — 464 с.
7. Маслов, В. Сварочные работы. Учебник / В. Маслов – 2015. – 285 с.
8. Неровный, В.М. Теория сварочных процессов. Учебник для вузов / В.М. Неровный, А.В. Коновалов, Б. Якушин, Э. Макаров, А.С. Куркин. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2016. - 704 с.
9. Москалев Н.С., Металлические конструкции, включая сварку [Электронный ресурс]: Учебник / Москалев Н.С., Пронозин Я.А., Парлашкевич В.С., Корсун Н.Д. - М. : Издательство АСВ, 2018. - 352 с.
10. Овчинников В.В. Основы теории сварки и резки металлов. Учебник. / В. Овчинников. - М.: Кнорус, 2019. — 414 с.
11. Овчинников В.В. Технология газовой сварки и резки металлов. Учебник. / В. Овчинников. - 5-е изд., стер. — М.: Академия, 2016. — 240 с.
12. Овчинников В.В. Технология ручной дуговой и плазменной сварки и резки металлов. Учебник. / В. Овчинников. - 5-е изд., стер. — М.: «Академия», 2016. — 240 с.
13. Овчинников, В. Газовая сварка (наплавка). Учебник. / В. Овчинников. - М.: "КноРус", 2018. - 204 с.
14. Овчинников, В. Ручная дуговая сварка (наплавка, резка). Учебник / В. Овчинников. – М.: "Академия", 2018. - 208 с.
15. Овчинников, В. Сварка и резка деталей из различных сталей, цветных металлов и их сплавов, чугунов во всех пространственных положениях. Практикум. / В. Овчинников. — 2-е изд., стер. — М.: Академия, 2015. — 160 с.
16. Овчинников, В. Частично механизированная сварка (наплавка) плавлением в защитном газе. Учебник / В. Овчинников. – М.: "КноРус", 2019. - 196 с.
17. Парлашкевич, В. Металлические конструкции, включая сварку. Учебник / В. Парлашкевич, Н. Москалев, Я. Пронозин, Н. Корсун. - М.: Издательство АСВ, 2014. - 353 с.
18. Пешков В. Специальные методы сварки и пайки. Учебник / В. Пешков, А. Коломенский, В. Казаков, В. Фролов. – М.: Альфа-М, Инфра-М, 2017. – 224 с.
19. Соколов, Г.Н. Порошковые и композиционные проволоки для сварки и наплавки. - Учебное пособие. / Соколов Г.Н., Дубцов Ю.Н., Зорин И.В., Артемьев А.А. — Волгоград: ВолгГТУ, 2015. — 128 с.
20. Храмцов, Н. Металлы и сварка. Лекционный курс. Учебник / Н. Храмцов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 208 с.

Дополнительная литература:

1. Теоретические основы сварки / Под ред. В.В.Фролова. М.: В. школа, 1970.
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. /Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768с.
3. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.Г. Технология и оборудование электрической сварки плавлением.- Машиностроение, 1977. 577с.
4. Сварка в СССР. Том 1. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. М.: Наука, 1981. 533с.
5. Сварка в СССР. Том 2. Теоретические основы сварки, прочности и проектирования. М.: Наука, 1982. 493с.

6. Сварка и свариваемые материалы: в 3-х томах. Т.1. Свариваемость материалов. Справ.изд./Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991.с.528.
7. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение, 1981. 248с.
8. Еремин Е.Н. Плазменно-дуговые технологические процессы в сварочном производстве. Учебное пособие.-Омск: изд-во ОмГТУ, 2000. 275с.
9. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. М.: Издательство МЭИ, 1998,1998. 162с.
10. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: Учебник для вузов /В.А. Бачин, В.Ф. Квасницкий, Д.И. Котельников и др.; под ред. В.А. Бачина. М.: Машиностроение, 1991. 352с.
11. Сварка трением: Справочник /Под ред. В.К. Лебедева, И.А. Черненко, В.И. Вилля. Л.: Машиностроение. 1987. 263с.
12. Машиностроение. Энциклопедия /Ред.совет: К.В.Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. М38 Оборудование для сварки. Т.IV-6 / В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Чвертко и др. Под.ред. Б.Е. Патона. 1999. 496с.
13. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций коррозий под напряжением. М.: Машиностроение. 1990. 384с.
14. Лашко С.В., Врублевский Е.И. Технология пайки изделий в машиностроении: Справочник проектировщика. М.: Машиностроение. 1993. 464с.
15. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. М.: Химия, 1986. 256с.
16. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов: Уч. пособие для вузов. М.: Химия, 2001. 376с.
17. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов.- Л.: Машиностроение, 1988. 224с.
18. Хасун А., Моригаки О. Наплавка и напыление./Перевод с японского под ред. Степина В.В. М.: Машиностроение, 1985. 285с.
19. Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие /Под ред. В.В. Смирнова. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. 848с.
20. Саликов В.А., Шушпанов М.Н., Коломенский А.Б., Пешков В.В., Фролов В.А. Сварка в самолетостроении. Учебное пособие. Воронеж. Изд-во ВГТУ. 2001. 431с.
21. Кудинов В.В., Бобров Г.Д. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. М.: Металлургия.1992.-432с.
22. Николаев Г.А., Винокуров В.А., Сварные конструкции. Расчет и проектирование: Учеб. для ВУЗов. М.: Высш.школа. 1990г. 446с.
23. Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Технология изготовления, механизация, автоматизация: Учеб.для вузов. М.: В.школа. 1991.-398с.
24. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности /В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев /Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение. 1996. 576с.
25. Электронно-лучевая сварка / Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др.; Под ред. Б.Е. Патона. – Наук. думка, 1987.– 265 с.
26. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев: Наукова думка.1976. 320с.
27. Копельман Л.А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. Л.: Машиностроение.1978. 231с.

28. Патон Б.Е., Спыну Г.А., Тимошенко В.Г. Промышленные роботы для сварки. Киев: Наукова думка, 1977. 280с.
29. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Контроль качества сварочных работ. М.: Высш. Школа. 1986. 204с.
30. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 496с.