

Введение Одним из важных направлений в материаловедении является совершенствование методов исследования структуры, испытание и определение физико- и термомеханических свойств материалов. Комплексную оценку структуры, прочностных свойств металлов и сплавов осуществляют традиционными методами металлографических исследований [1] и механических испытаний [2], которые требуют проведения длительного и трудоемкого цикла испытаний, связанного с подготовкой образцов. Исследования механических свойств с использованием разрушающих методов испытаний связаны с вырезкой образцов, которая не всегда возможна и желательна в условиях функционирования промышленного оборудования. В связи с этим актуальными являются исследования микроструктуры и механических характеристик материалов без разрушения элементов конструкции. Одним из перспективных неразрушающих методов исследований является метод мультифрактальной параметризации (МФП), сущность которого заключается в математической обработке программой «MFRDrom», разработанной Г.В. Встовским, оцифрованных металлографических изображений макро- или микроструктуры материалов [3].

Объектами исследований выступали сварные соединения, изготовленные из жаропрочной аустенитной стали 10X11H20T2P. Выбор их обусловлен высокими технологическими и эксплуатационными свойствами, широким применением в современной технике. Металлографические шлифы получены с использованием автоматической установки для шлифования и полирования. Для выявления границ зерен стали 10X11H20T2P использовали реактив Круппа со временем травления 1/3 мин. Для фиксации изображений микроструктур применяли стационарный микроскоп с увеличением до 1000 крат со встроенной цифровой камерой «AxioCamHR» для захвата фотографий; персональный компьютер с комплексом программного обеспечения: AxioVision, Adobe Photoshop, MFRDrom, MS Excel, MathCAD (в порядке использования программ). Предварительная подготовка изображений изучаемых структур заключалась в обработке цифровых изображений с использованием компьютерной графики. Для этого из фотографий в формате «Jpeg», полученных с цифровой камеры микроскопа, вырезались 9 областей, симметрично относительно исходного изображения; преобразовывались в битовый формат «BMP» с максимальной контрастностью и разрешением изображения 300 пикселей/дюйм методом «50% порог». Обработка исследуемой серии микроструктур заключалась в их загрузке в программу «MFRDrom», выборе типа спектра (Canon или Pseudo), количества знаков после запятой, основного цвета структуры, площади покрытия. Точность прогноза составляла до 97,8%. Для оценки механических свойств стали аустенитного класса применялся метод Виккерса. В качестве основных мультифрактальных параметров были выбраны характеристики упорядоченности $\Delta q = D1 - Dq$ и однородности Fq , которые вычислялись с помощью программы MFRDrom путём

перебора расчетного математического параметра q , характеризующего упорядоченность насыщения [3]. Для установления связей «мультифрактальные параметры – механические свойства» были проведены комплексные экспериментальные исследования [4, 5]. Исследованиями установлено, что на однородность и упорядоченность, полученные анализом «MFRDrom» структур сварных соединений, оказывают влияние такие дефекты, как поры (рис. 1), трещины и следы от шлифования, режимы травления. Моделированием дефектов структуры выявлена зависимость следов от шлифования образцов на результаты параметризации (рис. 2). Данные зависимости получены на аустенитных зернах равного размера и их подобной ориентации, т.е. при фиксированном балле зерна. Рис. 1 – Зависимость упорядоченности структуры от количества пор Рис. 2 – Зависимость упорядоченности структуры от длины трещины (следа от шлифования) Анализируя рис. 1-2, видно, что на упорядоченность структуры сварного соединения влияет как количество пор или шлаковых включений, а также размер трещин или следов от шлифования и полирования. Это необходимо учитывать при подготовке шлифов и выборе мест исследования сварного соединения, т.к. участки шлифа с дефектами получения и структуры могут искажать результаты расчета. Адаптация метода параметризации структур для исследования сталей аустенитного класса заключалась в особенностях подготовки изображений микроструктур сварных соединений, различных баллах зерна для сварного шва, зоны термического влияния и основного металла, различной ориентации зерен после шлифования и травления, наличия дефектов сварных соединений. Указанные выше факторы влияют на однородность и упорядоченность структуры сварного соединения в целом и отдельных зон в частности. При их исследовании необходим рациональный выбор мест для параметризации структур, количества таких участков с поправкой на возможные отклонения режимов и неравномерности травления структуры, увеличения микроскопа и других факторов, т.е. параметризация сварных соединений должна проводиться в максимально «подобных» условиях. Проведена серия измерений твердости на образцах без дефектов, с дефектами, после разделки и подварки дефектов. Распределение твердости по Виккерсу для образца с горячей трещиной приведено на рис. 3. Рис. 3 – Распределение твердости образца с трещиной по сварному соединению (9 измерений) Разброс значений твердости в сварном соединении связан с различным баллом зерна во фланце и обечайке объекта исследования (корпуса камеры сгорания) и возможной структурной неоднородностью материалов. Следует отметить, что указанные элементы конструкции имеют различие в химическом составе по содержанию отдельных элементов, но относятся к одному классу аустенитных сталей. Авторами исследований предложен алгоритм (рис. 4), позволяющий прогнозировать твердость по Виккерсу для однотипных образцов, сваренных на одинаковых режимах, без проведения

испытания на твердость. Поскольку микроструктура сварных соединений во многом зависит от режимов сварки, в том числе и тепловых, прогнозирование структуры и ее механических свойств необходимо начинать с расчета температурных полей и анализа структуры металлов до сварки. Рис. 4 – Алгоритм прогнозирования твердости

Алгоритм, приведенный на рис. 4, включает следующие этапы: 1. На первом этапе задаются необходимые исходные данные в виде параметров режима сварки, марки свариваемого материала, толщин и др. 2. По известным методикам производится расчет распределений температуры в трех координатных плоскостях по сварному соединению, включая сварной шов, линию сплавления, зону термического влияния и основной металл. 3. На третьем этапе моделируется структура по сечению сварного шва на основе распределения температуры, расстояния от источника нагрева в процессе сварки, прошедшего времени после сварки или проводится анализ исследуемого участка микроструктуры сварного шва традиционными методами металлографии. В таком случае расчет температурных полей как этап может быть исключен. 4. На следующем этапе с помощью программы «MFRDrom» вычисляются соответствующие параметры: однородность, упорядоченность и балл зерна различных участков сварного шва. 5. На пятом этапе алгоритма производится аппроксимация функций твердости HV (измеренных участков), приращений температуры ΔT , однородности F200 и упорядоченности D1 – D200, с привязкой их к координатам сварного соединения, т.е. отдельные участки и зоны будут иметь строго определенные значения аппроксимированных функций. Совместное решение системы уравнений, указанных в пункте 5, возможно методом нейронных сетей в пакете прикладных программ MATLAB. Прогнозирование твердости может быть также проведено нормировкой функций, составлением матрицы планирования полного факторного эксперимента, оценкой однородности дисперсий функции отклика и вычислением коэффициентов полинома математической модели. Решение такой системы уравнений позволяет рассчитать твердость на начальных этапах проектирования сварных соединений.