

PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS

Engel R. Galimov¹, Alsou G. Ablyasova¹, Amir S. Maminov¹,

Sergei V. Kuryntsev¹, Alexei V. Belyaev¹

¹Kazan State Technical University. AN Tupolev, 420111, Kazan, Russian Federation,

E-mail: material@material.kstu-kai.ru

Abstract

The possibility of mechanical properties' identification, as illustrated by hardness HV, for various zones of a welded connection of gas turbine engines parts made from steels of austenite grade on the basis of multifractal analysis of metallographic images of structure and calculation of temperature fields was shown.

Key words: *austenitic steel, mechanical properties, welds, multifractal analysis*

1. ВВЕДЕНИЕ

Важным направлением в машиностроении для решения технических проблем является разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях.

В настоящее время оценку изменения структуры металлических материалов осуществляют традиционными металлографическими методами, а механические свойства – соответствующими исследованиями. Однако это требует трудоемкой подготовки образцов и многочисленных испытаний в соответствии с нормативно-технической документацией. В ряде случаев просто недопустима или невозможна вырезка образцов для испытания на временное сопротивление из действующих объектов машиностроения.

Подобные испытания можно не проводить, используя методологию параметризации структур. В связи с этим перспективным направлением является установление взаимосвязи механических свойств металлов с результатами параметризации цифровых изображений микроструктуры сварных соединений.

Теория параметризации благодаря дополнительному математическому анализу позволяет оценивать параметры однородности и упорядоченности, характеризующие меру нарушения самоподобия и отражающие геометрическую неоднородность составляющих изображения. Данный алгоритм успешно реализован в программе MFRDrom для ЭВМ. Определение механических свойств параметризацией структуры не требует проведения испытаний, длительной и затратной подготовки образцов. Однако ряд вопросов параметризации структур сварных соединений из сталей и установления зависимости их механических свойств от результатов параметризации ввиду остаются до конца не изученными.

В связи с этим актуальную проблему представляют комплексные исследования, направленные на адаптацию методики параметризации для оценки механических свойств различных зон сварных соединений, что вызывает необходимость разработки алгоритма и практических рекомендаций по подготовке металлографических изображений структур к параметризации.

2. СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

Методология параметризации структур материалов разработана и описана в трудах Б. Мандельброта, Р.Л. Хадсона, А.Г. Колмакова, Г.В. Встовского, И.Ж. Бунина, В.С. Ивановой, А.В. Вотинова, Э.Р. Галимова, В.В. Герова, А.С. Баланкина, И.Ж. Бунина, А.А. Оксогоева, Л.Г. Авдеевой, А.Д. Амирова и др.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

3.1. Эксперимент

Основные результаты работы получены применением методов механических испытаний, спектрального, радиографического и металлографического анализов. Получены сравнительные результаты химического состава, механических свойств (протоколы испытаний) и структуры, параметризации структуры, расчета температурных полей. Объекты исследования – сварные соединения наружных корпусов камер сгорания приводов компрессоров газоперекачивающих станций, выполненные из жаропрочной аустенитной стали 10X11H20T2P.

Практическая значимость работы заключается в том, что по результатам проведенных исследований разработана методика определения свойств сталей аустенитного класса на основе методологии параметризации структур и расчета температурных полей без проведения механических испытаний неразрушающим способом, без вырезки образца, либо при их однократном проведении для серии однотипных сварных соединений одного структурного класса.

Внедрение результатов исследований. Результаты исследований нашли практическое применение при прогнозировании свойств в лабораториях механических испытаний сварных деталей машиностроения на ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение», ОАО «Казанькомпрессормаш», что подтверждено актами внедрения.

Металлографические изображения получались на автоматической установке для шлифования и полирования, для выявления границ аустенитных зерен аустенитной стали 10X11H20T2P использовался реактив Круппа со временем травления 20 с, переносной и стационарный микроскоп с увеличением до 500 крат с цифровой камерой AxioCamHR для захвата фото и видео, поверенный стационарный твердомер по Виккерсу, персональный компьютер с программным обеспечением MFRDrom, Abode Photoshop 7.0, MS Excel 2007, MathWorks MATLAB 2010 и StatSoft STATISTICA 9.0.

Предварительная обработка изучаемых изображений структур заключалась в обработке цифровых изображений с использованием компьютерной графики – программы Adobe Photoshop. Для этого из полученных с цифровой камеры фотографий в формате Jpeg вырезались 6 областей размером 512×512 пикселей симметрично относительно отпечатка индентора, преобразовывались в битовый формат BMP с максимальной контрастностью 100% и разрешением изображения 300 пикселей на дюйм методом диффузии. Обработка серии структур заключалась в их загрузке в программу, выборе типа спектра (Canon или Pseudo), количества знаков после запятой, основного цвета структуры, площади покрытия (100 %). Точность прогноза составляла $\approx 97\%$, при этом отмечается существенное уменьшение времени испытания.

При рассмотрении тройной диаграммы состояния железохромоникелевых сплавов с содержанием углерода 0,10%, построенной на основании результатов, полученных при быстром охлаждении с высоких температур (950 – 1150°C), установлено, что структура стали

10X11H20T2P – неустойчивый аустенит, а основной упрочняющей фазой является γ' -фаза – β - Ni_3Ti .

По традиционной технологии фланец приваривается к корпусу камеры сгорания автоматической аргонно-дуговой сваркой неплавящимся электродом (Fig. 1).

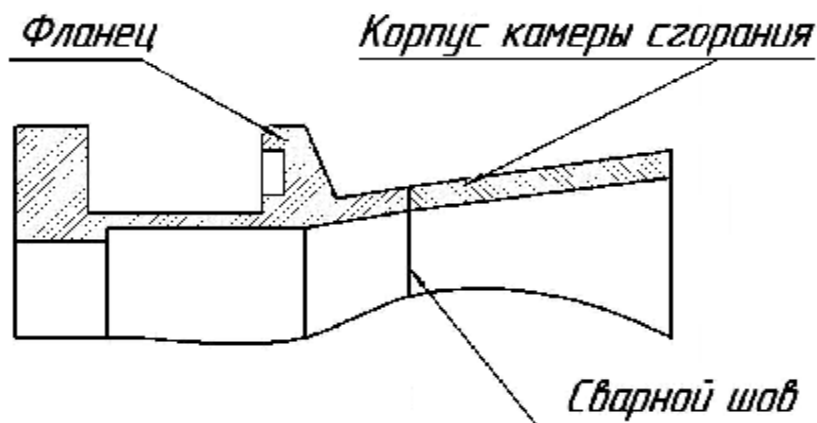


Fig.1. Схема приварки фланца к корпусу камеры сгорания привода компрессора

Схема расположения неплавящегося вольфрамового электрода приведена на рис. 2. Сечение сварного шва должно удовлетворять требованиям размеров, обозначенных на рис. 3.

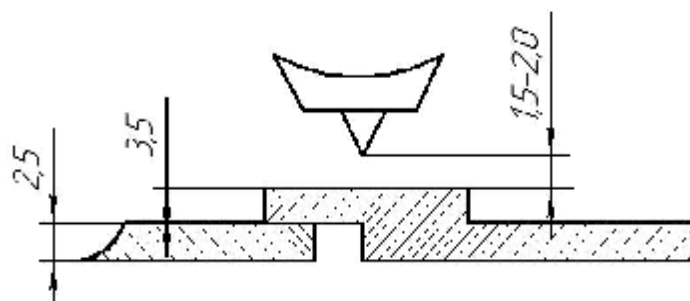


Fig.2. Схема расположения неплавящегося электрода

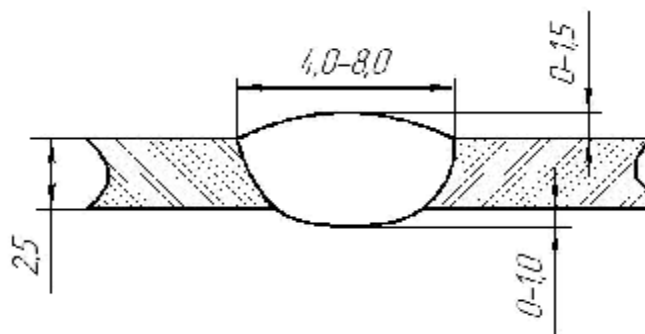


Fig.3. Продольное сечение стыкового сварного соединения

Сварка осуществляется при следующих режимах: полярность прямая, сила сварочного тока $I_{\text{св}} = 160 \pm 20$ А, скорость сварки $v_{\text{св}} = 0,26 - 0,3$ м/мин, электрод вольфрамовый иттрированный

диаметром $d_s = 4$ мм. В качестве основной защиты сварного шва применяется гелий Б по ТУ 51-940-80 с расходом 20 – 30 л/мин, аргон 1 или высшего сорта – 10 – 15 л/мин, а для корня шва – аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79 с расходом 10-15 л/мин.

При аргонодуговой сварке корпусов возникают дефекты в виде горячих трещин (Fig. 4). Для исследуемых образцов проведен радиографический анализ на предмет выявления дефектных и бездефектных участков.



Fig.4. Рентгенограмма сварного шва с трещинами

С целью установления причины возникновения трещин (Fig. 5) был проведен микроструктурный анализ продольных сварных соединений (основной металл, зона термического влияния, линия сплавления и сварной шов) наружного корпуса камеры сгорания и фланцев различной конструкции, т.к. при приварке фланца присутствовали дефекты сварки.



Fig.5. Микроструктура сварного шва с трещиной при $\times 100$

Для установления соответствия химическому составу по ГОСТ был проведен спектральный анализ образцов, применявшихся в исследовании и серии замеров твердости по Виккерсу HV_{30} . Микроструктура сварного шва с характерной горячей трещиной (Fig 6).



Fig.6. Панорамное изображение образца с фланцем повышенной жесткости с трещиной ($\times 100$)

Аппроксимацией и сглаживанием получены полиномиальные кривые распределения твердости для образца с фланцем существующей технологии без дефектов, с фланцем повышенной жесткости по предлагаемой технологии без дефектов, с трещиной, после наплавки с трещиной и после наплавки без дефектов – зависимости (1-5) соответственно. Данные уравнения получены относительно центра сварных соединений и необходимы в дальнейшем для установления взаимосвязи механических свойств с результатами параметризации.

Анализируя распределение твердости, можно судить о снижении механических свойств по зоне термического влияния, линии сплавления и сварному шву, где происходит изменение в баллах зерна, а также наблюдаются различия в твердости фланца и обечайки. Расчетным путем установлена склонность стали 10X11H20T2P к образованию горячих трещин.

Проведен расчет температурных полей при аргонодуговой сварке. Исходные данные для расчета следующие: материал – сталь 10X11H20T2P, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,29$ Вт/(см · К), объемная теплоемкость $c_p = 4,75$ Дж/(см³ · К), коэффициент температуропроводности $a = 0,06$ см²/с, эффективность (КПД) – 0,85, число БИО $Bi \approx 0,0517$, сила сварочного тока $I_{св} = 160 \pm 20$ А, $U_d = 22$ В, скорость сварки $v_{св} = 0,26 - 0,3$ м/мин = $0,43 - 0,5$ см/с, толщина деталей в зоне сварки $S = 2,5$ мм, сварка встык за один проход. Температура по толщине листа равномерна, а теплота может распространяться только в плоскости детали. За начало отсчета температуры принимается исходная температура тела и окружающей среды.

Расчетные методы базируются на уравнении теплопроводности для случая трехмерного тела с окружающим пространством:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T,$$

где $\nabla^2 T$ – оператор Лапласа; $a = \lambda/c\rho$ – коэффициент температуропроводности.

Поскольку размеры и форма исследуемого сварного соединения обладают сравнительно малой толщиной и близкое к пластине, то примем его за полубесконечную пластину. С некоторыми допущениями источник нагрева принимался за линейный непрерывно действующий источник теплоты, а тепловой расчет проводился на основе информации о мгновенных значениях переменных при условии конвективного теплообмена. При этом уравнение приращение температур в пластине в стадии теплонасыщения описывается уравнением:

$$\Delta T_{np} = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-vx/(2a)} K_0 \left(\frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}} \right),$$

где K_0 – функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка, q – количество теплоты, δ – толщина пластины, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние до рассматриваемой точки от начала координат, a – температуропроводность, λ – коэффициент теплопроводности, t – время, b – коэффициент теплоотдачи, v – скорость сварки.

Результаты расчета приращения температуры ΔT , К представлены в виде зависимости приращения температуры от расстояния x до центра сварного шва (Fig. 7). При уменьшении скорости сварки до 6 м/ч график распределения температуры в сварном соединении показан на Fig. 8.

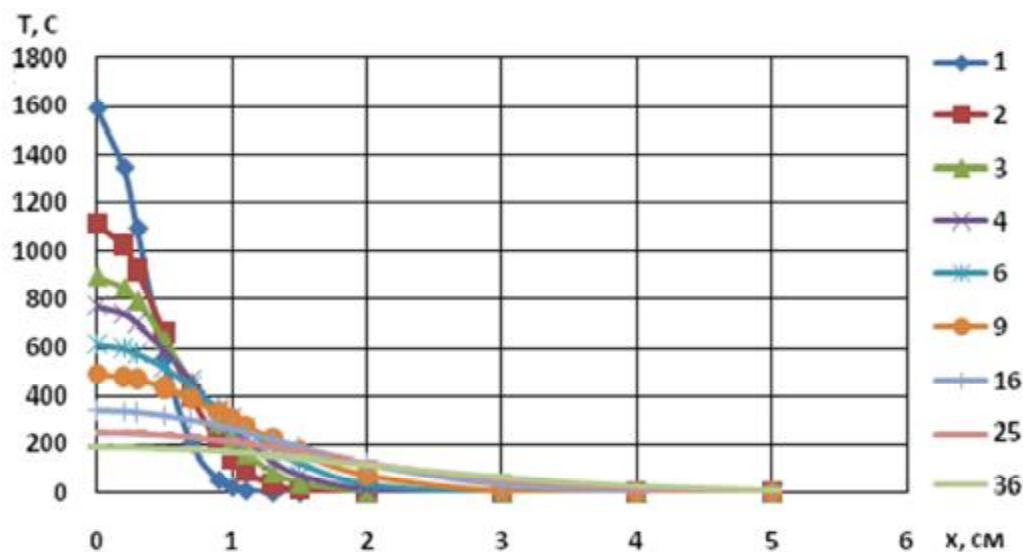


Fig. 7. График приращения температуры при сварке встык листов 2,5 мм; кривые распределения температуры по оси ОУ в разные моменты времени (1 – 36 сек.)

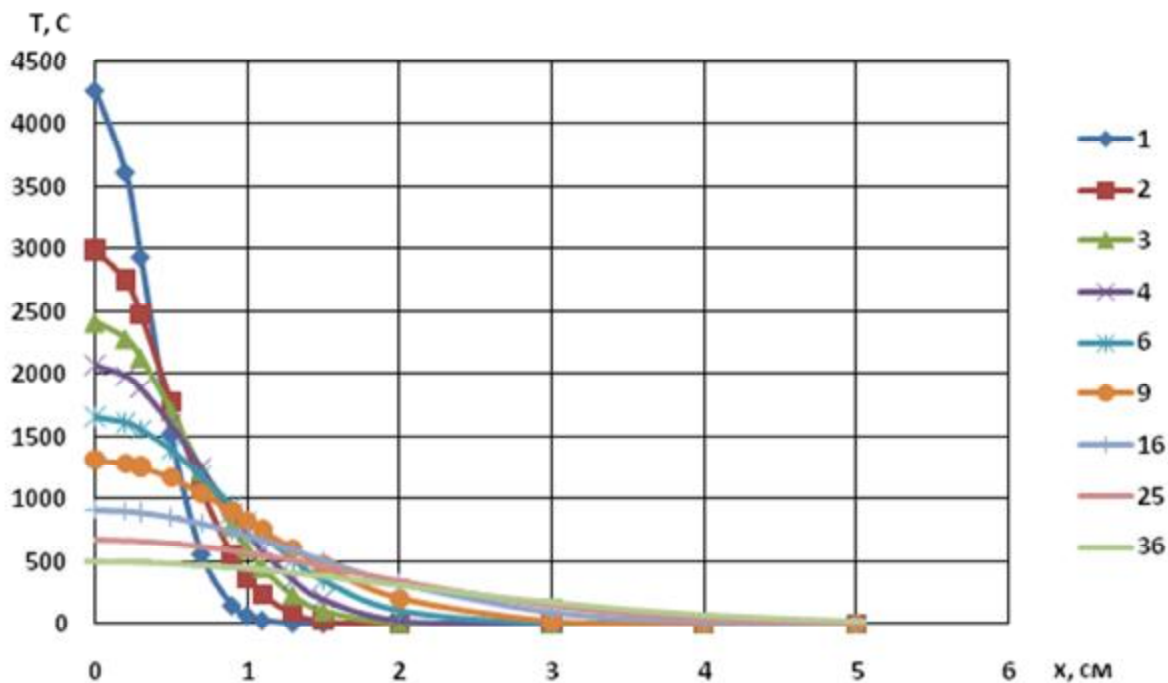


Fig.8. График приращения температуры в сварном соединении при скорости сварки 6 м/ч по оси ОУ в разные моменты времени (1 – 36 сек.)

Известно, что для предотвращения образования горячих трещин необходимо выбрать оптимальную силу сварочного тока $I_{св}$ и скорость сварки $v_{св}$, т.е. погонной энергии $q_{п}$.

Снижение силы тока $I_{св}$ менее результативно. В этом случае обобщенным критерием режима является энергозатраты qv , приходящиеся на секундную длину шва.

Представлена методика подготовки сварных соединений к параметризации в программе MFRDrom, которая включала вырезку и изготовление микрошлифа, травление, фотографирование, оцифровку изображения, выделение 6 областей необходимого размера из микроструктуры, преобразование изображений. Из всех параметров металлографической структуры были выбраны однородность F_{200} и упорядоченность $D_1 - D_{200}$, как наиболее информативные параметры.

Экспериментальные данные (Fig. 9, 10) позволяют установить зависимость однородности и упорядоченности структуры при малых (100-150) и при больших разрешениях изображений (600-800). Получены на основной шкале 1 для определения балла зерна (1-10) при увеличении $\times 100$. Однородность и упорядоченность структур балла «0» при увеличении $\times 50$ соответствуют параметрам балла «-1» при увеличении $\times 25$ и т.д.

На получаемые в результате параметризации программой MFRDrom упорядоченность и однородность оказывают влияние размер, разрешение сканера или камеры, с помощью которых получено изображение. Твердость по Виккерсу HV_{30} замерялась в продольной плоскости сварного соединения.

Результаты измерения твердости и параметризации подвергались статистической обработке, построены графики распределения твердости, параметров однородности и упорядоченности, получены соответствующие уравнения распределения. Установлено, что размер изображения оказывает меньшее влияние и лишь при высоких баллах зерна анализируемой стали.

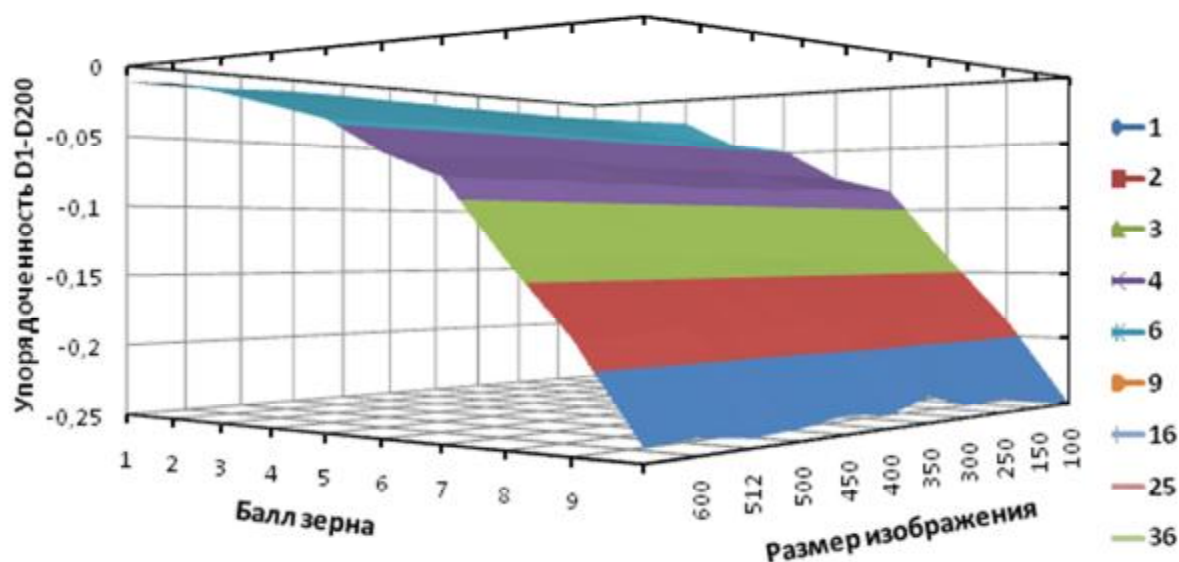


Fig. 9. Зависимость упорядоченности от размера изображения

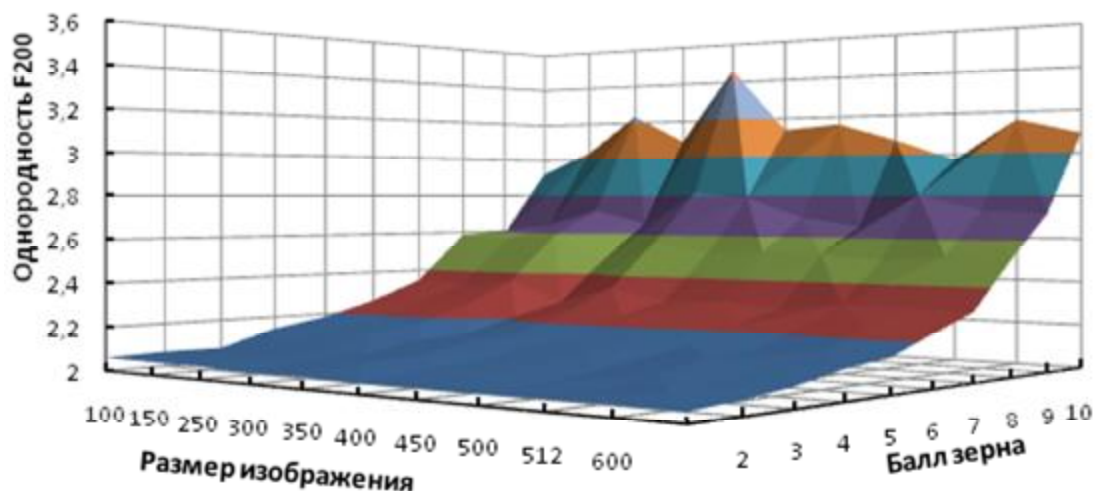


Fig. 10. Зависимость однородности от размера изображения

Существует достаточно четкая корреляция между баллом зерна и параметрами однородности и упорядоченности, что позволяет в автоматизированном режиме определять балл зерна методом параметризации структур взамен визуальной оценки.

Определена система соответствующих уравнений распределения твердости и однородности/упорядоченности и результатов параметризации. Данное решение позволит определить с заданной степенью вероятности твердость по изображению структуры аустенитной стали 10X11H20T2P. Проведение подобного анализа и измерения механических свойств для других марок сталей, сталей различных структурных классов и других металлов и сплавов, в том числе сварных соединений, после наплавки, напыления покрытий и других видов обработки позволит создать программу на основе алгоритма MFRDrom и базу данных материалов с параметрами, что в свою очередь реализует возможность определения механических свойств на примере твердости по Виккерсу по изображению структуры.

Составлены пять систем равенств (Table 1) для определения твердости по кривым упорядоченности $D_1 - D_{200}$ и однородности F_{200} изображений структур для образца существующей технологии исполнения без дефектов (формула 1), фланцем повышенной жесткости без дефектов (формула 2), с трещиной (формула 3), после наплавки с трещиной (формула 4) и после наплавки без дефектов (формула 5).

Показано, что чем больше однородность F_{200} , тем более однородная структура; чем больше упорядоченность $D_1 - D_{200}$, тем более упорядочена изучаемая параметризацией структура. Изменения (текстура деформации, наклеп зеренной структуры), в том числе и в технологическом процессе, приводящие к изменению структуры, вызывают изменение результатов параметризации. Следует отметить, что аустенитная и ферритная структуры при одинаковом балле зерна имеют различающиеся параметры.

Для расширения области применения анализа структуры на основе параметризации и возможности его использования не только для сварных конструкций, проведены исследования образцов с напыленными плазменными покрытиями, на рис. 26 приведена микроструктура-схема плазменного покрытия.

Table 1. Уравнения регрессии однородности и упорядоченности сварных соединений из стали аустенитного класса 10X11H20T2P

Параметр	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации R ²	Обозначение
D ₁ -D ₂₀₀ ¹	$3 \cdot 10^{-7}x^6 - 5 \cdot 10^{-6}x^5 - 5 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,001x^2 - 0,016x + 0,120$	0,557	(1)
F ₂₀₀ ¹	$9 \cdot 10^{-7}x^6 + 2 \cdot 10^{-6}x^5 - 8 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,001x^2 + 0,025x + 0,650$	0,333	
D ₁ -D ₂₀₀ ²	$-0,0003x^3 - 0,0089x^2 + 0,0191x + 0,1196$	0,97	(2)
F ₂₀₀ ²	$0,0007x^4 - 0,0002x^3 - 0,0249x^2 + 0,0239x + 0,454$	0,9662	
D ₁ -D ₂₀₀ ³	$0,0006x^3 - 0,0058x^2 + 0,0014x + 0,0943$	0,9559	(3)
F ₂₀₀ ³	$0,0004x^4 - 0,0006x^3 - 0,0093x^2 + 0,0207x + 0,2662$	0,9537	
D ₁ -D ₂₀₀ ⁴	$0,0007x^3 + 0,0065x^2 - 0,0028x + 0,0814$	0,9697	(4)
F ₂₀₀ ⁴	$-0,0008x^3 + 0,0056x^2 - 0,0081x + 0,3244$	0,9797	
D ₁ -D ₂₀₀ ⁵	$0,0004x^4 - 0,0101x^2 + 0,0022x + 0,1575$	0,9587	(5)
F ₂₀₀ ⁵	$0,0003x^4 - 0,0031x^3 - 0,0182x^2 + 0,0478x + 0,6016$	0,98	
T	$261,5x^5 - 1295x^4 + 2621,4x^3 - 1288,2x^2 - 1913,3x + 1653,3$	0,98	(6)

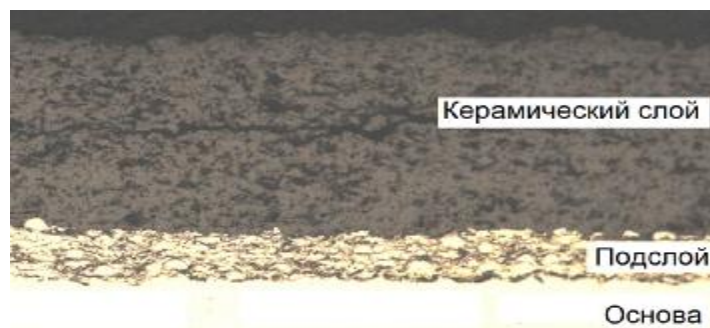


Fig. 11. Схема плазменного покрытия

Исследованию подвергали керамический слой теплозащитного покрытия и в целом систему покрытия; по 5 BMP-формата изображений в режиме bitmap для каждого. Результаты параметризации представлены на Fig. 12 для системы «основа – подслей – керамический слой».

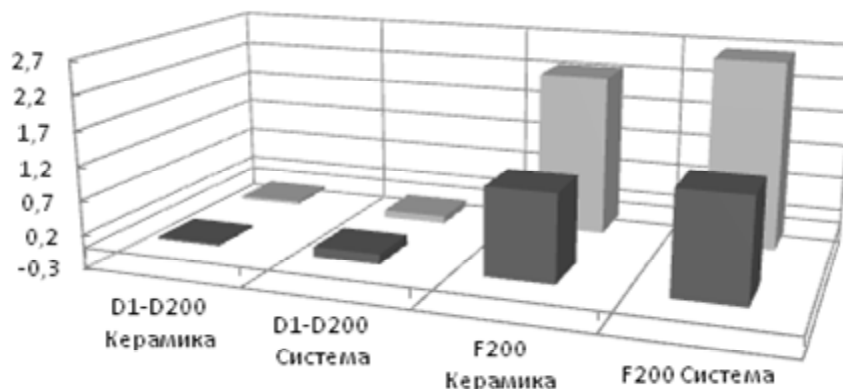


Fig. 12. Диаграмма результатов параметризации системы «основа – подслей – керамический слой» и керамического слоя, на ближнем плане однородность F_{200} , на дальнем плане – упорядоченность $D_1 - D_{200}$

Подходы, разработанные для оценки твердости можно использовать при определении других механических свойств сварных соединений (временное сопротивление, ударная вязкость и др.). Для этого необходимо провести соответствующие испытания материалов, либо использовать специальные переводные таблицы величин.

4. ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения механических свойств сварных соединений деталей машин параметризацией металлографических изображений и расчетом температурных полей, которая включает подготовку шлифов, получение изображений, параметризацию, обработку результатов.
2. Исследованы механические свойства сварных соединений сталей аустенитного класса и выявлены закономерности их изменения в зависимости от структуры и тепловых режимов сварки. Установлено, что химический состав исследуемых образцов соответствует ГОСТ, сварные соединения обладают различным баллом зерна по основному металлу, зоне термического влияния и сварному шву.
3. Выявлено влияние характера подготовки металлографической поверхности на результаты параметризации. На однородность и упорядоченность влияют балл зерна, размер и количество пор, шлаковых включений и трещин, следы от механической обработки, непотравленность границ зерен, размер изображения структуры и разрешение, с которым оно было получено, а также увеличение изображения.
4. Установлена взаимосвязь твердости сварных соединений сталей аустенитного класса с результатами параметризации металлографических изображений с вероятностью до 97%.
5. Установлена взаимосвязь параметров упорядоченности и однородности с результатами расчета тепловых полей сварных соединений корпусов камер сгорания приводов компрессоров газоперекачивающих станций из сталей аустенитного класса.

6. Определено влияние исходных данных цифровой обработки изображений на результаты параметризации структуры. Показано, что основными характеристиками, позволяющими оценить однородность и упорядоченность структуры, являются размер изображения и его разрешение.
7. Установлена закономерность изменения изображения микроструктуры сталей и механических свойств на примере твердости по Виккерсу в зависимости от тепловых режимов сварки.
8. Разработаны практические рекомендации, включающие уменьшение скорости сварки, для выбора параметров режима аргонодуговой сварки соединений из сталей аустенитного класса на основе расчета тепловых полей.

REFERENCES

1. Встовский Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов (2001). Ижевск. 116 с.
2. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении (1994). Москва. 383 с.