# Проблематика анализа зависимости размеров структурных составляющих синтезированных 3DMP-методом образцов от стратегии волнового термодеформационного упрочнения

А.В. Киричек  $^{l}$ , С.О. Федонина  $^{l}$ 

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50-летия Октября, 7, Брянск, 241035, РФ

#### Аннотация

Описана проблематика анализа металлографических изображений и способ их решения применением современного ПО для анализа металлографических изображений. В данной работе рассматривается проблема анализа микроструктуры деталей, полученных в результате чередования операций наплавки 3DMP-методом волнового и термодеформационного упрочнения (ВТДУ), основанного на расширении технологических возможностей известного ранее волнового деформационного упрочнения (ВДУ). Анализ структурных составляющих синтезированных характерных размеров образцов. упрочненных по разным стратегиям ВТДУ, проводится в программном комплексе SIAMS в разделе «Многофазный анализ». Приводится краткое пояснение особенности применения программного обеспечения для конкретного случая. В результате металлографических исследований с помощью ПО SIAMS микроструктуры деталей, полученных в результате чередования операций наплавки 3DMP-методом и ВТДУ, определены характерные размеры колоний частиц и мелкодисперсных частиц раздробленных дендритов в каждом наплавленном слое, выявлен характер распределения структурных составляющих по сечению образов в направлении наплавки.

#### Ключевые слова

Анализ, изображение, упрочнение, 3DMP-синтез, микроструктура.

# The Problems of Analyzing the Dependence of the Sizes of Structural Components of Samples Synthesized by the 3DMP Method on the Strategy of Wave Thermal Deformation Hardening

A.V. Kirichek<sup>1</sup>, S.O. Fedonina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bryansk State Technical University, boulevard of the 50th anniversary of October, 7, Bryansk, 241035, RF

#### Abstract

The problems of analysis of metallographic images and the way to solve them using modern software for the analysis of metallographic images are described. In this paper, we consider the problem of analyzing the microstructure of parts obtained as a result of alternating surfacing operations by the 3DMP method and wave thermal deformation hardening (HTSH), based on the expansion of the technological capabilities of the previously known wave work hardening (WSH). The analysis of the characteristic dimensions of the structural components of the synthesized samples, hardened according to different strategies of HTFS, is carried out in the SIAMS software package in the "Multi-phase analysis" section. A brief explanation of the features of using the software for a particular case is given. As a result of metallographic studies using the SIAMS software of the microstructure of parts obtained as a result of alternating surfacing operations by

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия EMAIL: avkbgtu@gmail.com (А.В. Киричек); fedonina.sv2015@gmail.com (С.О. Федонина)

<sup>&</sup>lt;u>ORCID: 0000-0002-3823-0501</u> (А.В. Киричек); 0000-0002-0472-4845 (С.О. Федонина)



© 2022 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). the 3DMP method and HTDU, the characteristic sizes of particle colonies and fine particles of crushed dendrites in each deposited layer were determined, and the nature of the distribution of structural components over the cross section of the samples in the direction of surfacing was revealed.

#### Keywords

Analysis, image, hardening, surface plastic deformation, surface layer, carburization, chemical and thermal treatment, microstructure.

## 1. Введение

Изучение микроструктуры различных материалов является отправной точкой для назначения режимов упрочняющей обработки, обеспечивающей требуемые механические свойства поверхностного слоя или эксплуатационные свойства детали. При исследовании микроструктур, полученных в результате воздействия известными методами (например, термической обработкой или поверхностным пластическим деформированием (ППД)), в условиях производства чаще всего используются методы визуального сравнения полученных изображений со справочными данными (ГОСТы, справочники, атласы структур и т.д.). Результативность такого анализа зависит от качества полученного изображения и опыта металловеда и фактически является субъективным фактором [1]. В результате визуального анализа возможно получение недостоверных данных, в основном – примерное определение баллов структурных составляющих, связанных с неравномерным разделением и/или разноразмерностью фазовых составляющих, большого количества областей с неметаллическими включениями в материале, что может привести к различным негативным последствиям, браку готовой детали и т.д. Кроме того, к проведению металлографических исследований предъявляются требования по количеству исследуемых образцов и их площадей, что сопровождается необходимостью выполнения многочисленных трудоемких исследований. Указанные недостатки препятствуют широкому применению метода визуализации в обширных исследованиях.

Современное металлографическое оборудование позволяет не только сделать качественное фото микроструктуры, но и провести серию измерений основных параметров фазовых составляющих, таких как длина, площадь, периметр и т.д. Однако, проведение углубленных исследований, таких как определение глубины перехода одной фазовой составляющей в другую или изменение размера зерна по сечению образца, предполагает исследования множества фрагментов структуры и их длительный анализ, результат которого, как и в предыдущем случае, может носить субъективный характер.

При исследовании принципиально новых методов упрочнения или комбинаций ранее известных методов такие способы определения структурных составляющих в большинстве случаев не подходят. Применение компьютерных технологий при решении задач анализа микроструктуры позволяют снизить роль субъективного фактора за счет увеличения числа анализируемых участков и существенного снижения трудоемкости исследования.

# 2. Основная часть

Металлографические исследования представляют собой сложный многоэтапный процесс, в котором от корректности выполнения каждого этапа, начиная от выбора сечения исследуемой детали и подготовки микрошлифов до профессионального анализа микроструктуры, зависит достоверность полученных результатов.

Изображения микроструктуры представляют собой комбинацию разнообразных структурных составляющих с характерными геометрическими размерами и формами, распределенными с разной плотностью и ориентацией. Комбинация этих структурных составляющих зачастую дает сложную картину, интерпретация которой требует определенного уровня профессиональной подготовки.

Повышение эффективности металлографического анализа возможно с помощью использования специализированного металлографического программного обеспечения [2], имеющего широкий спектр возможностей от определения характерных размеров и количества структурных составляющих до выделения нескольких (двух, трех, четырех) фаз в одном материале и анализ их основных параметров (занимаемая площадь, процентное соотношение и т.д.) [3] и определения глубины обезуглероженного слоя. Кроме того, такие программы могут работать как в комплексе с металлографическими микроскопами, так и как самостоятельное ПО. При необходимости возможно использование вспомогательных опций, позволяющих изменить освещенность готовой фотографии для ее эффективной обработки, провести автоматический расчет твердости по определенному размеру отпечатков, определить контур и размеров пазов, провести исследование дефектов и параметров сварного шва и т.д.

Итогом проведенных металлографических исследований с применением специализированного ПО рекомендуется считать статистическую обработку полученных в процессе измерения характеристик объектов, определение средних значений этих величин, а также построение графических зависимостей для визуализации процесса анализа. Однако, невозможно полагаться полностью на полученные ПО результаты без последующего анализа полученных данных с материаловедческой точки зрения [4].

Таким образом, возможности современного металлографического ПО позволяют получить наиболее полный и достоверный анализ микроструктуры при существенном сокращении длительность обработки.

В данной работе рассматривается проблема анализа микроструктуры деталей, полученных в результате чередования операций наплавки 3DMP-методом и волнового термодеформационного упрочнения (ВТДУ), основанного на расширении технологических возможностей известного ранее волнового деформационного упрочнения (ВДУ).

Исследование осложняется тем, что в результате деформационного воздействия по сечению образца происходит не равномерное дробление сформированных после наплавки столбчатых кристаллитов (дендритов). Применяемые стратегии упрочнения предполагают послойное или периодическое (через несколько слоев) ВТДУ, формируя в каждом конкретном случае особенную микроструктуру.

С целью выявления закономерностей формирования микроструктуры в зависимости от технологических факторов ВТДУ проводились эксперименты упрочнения синтезированных из проволоки образцов по различным стратегиям: с упрочнением только верхнего наплавленного слоя, с чередованием 5 слоев и послойное упрочнение. Для определения характера изменения микроструктуры в результате деформационного воздействия изготавливался образец, синтезированный без упрочнения. В качестве исходного материала использовалась коррозионностойкая хромоникелевая проволока ESAB OK Autrod 309LSi.

Предварительные металлографические исследования на микроскопе Leica DVM6A позволили измерить характерный размер частиц и колоний в каждом слое образца, упрочненного с выбранной стратегией, некоторые из них приведены на рисунке 1.

Установлено, что для структуры неупрочненного синтезированного образца характерно наличие столбчатых кристаллитов (дендритной структуры) с разной степенью развития осей, рисунок 1, а. В целом, структура данного образца транскристаллитная дендритная, где дендриты переходят из слоя в слой и имеют длину более 2000 мкм.

Применение упрочняющей обработки позволило раздробить сформированные в результате наплавки дендриты на более мелкие части. Структура образцов, полученных чередованием наплавки и упрочнения, комбинированная и содержит явно выраженные мелкодисперсные частицы размером менее 30 мкм и большое скопление частиц, расположенных вблизи оси роста исходного кристаллита, названное колонией частиц. Характерные изменения микроструктуры в зависимости от стратегии упрочнения показаны на примере сравнения микроструктур 5 слоев, рисунок 1, б-г. Установлено, что более частое применение ВТДУ позволяет получить колонии частиц и частицы наименьших размеров, независимо от глубины залегания слоя.



**Рисунок 1** – Влияние стратегий ВТДУ на микроструктуру выращенной детали из стали 309LSi, x600

В ходе исследований было замечено, что во всех упрочненных образцах длина колоний уменьшается с ростом глубины залегания слоев за счет отделения от колоний мелкодисперсных частиц и их диффундирования в матрицу материала, рисунок 2. Отмеченный эффект объясняется глубиной упрочнения до 10 мм, что позволяет обеспечить различную кратность воздействия на слои волной деформации. Например, при послойном упрочнении верхний 10 слой был упрочнен 1 раз, 8 слой - 3 раза и т.д.

Структура послойно упрочненных образцов несколько отличается от упрочненных с чередованием нескольких слоев: в верхней части образца присутствуют колонии частиц, наибольших для этого слоя размеров, в нижней (около 1/3 слоя) – мелкодисперсные частицы, равномерно распределенные по матрице материала, переходная часть содержит частицы средних размеров.

Анализ характерных размеров структурных составляющих синтезированных образцов, упрочненных по разным стратегиям, проводился в программном комплексе SIAMS в разделе «Многофазный анализ». В данном случае ПО работает отдельно от микроскопа, поэтому для анализа загружались сформированные заранее фотографии микроструктуры. В результате обработки на исходное фото, рисунок 3, а, накладывалась «маска», позволяющая выделить каждый структурный элемент, рисунок 3, б, после чего проводится автоматический подсчет выбранных параметров, рисунок 3, в.

Целью анализа микроструктур было определение характерного размера колоний осколков дендритов и частиц и соотношение с их количеством. Поэтому исследования проводились только для фазы 1, рисунок 3, б.



Рисунок 2 — Микроструктура верхней части слоев послойно упрочненного синтезированного из проволоки образца из стали 309LSi хромо-никель-молибденовой группы, x600

На основании экспериментальных данных выявлен характер изменения размеров колоний и частиц в зависимости от глубины залегания слоя и применяемой стратегии упрочнения, рисунок 4. Установлено, что на протяжении 10...6 слои происходит характерное уменьшение размеров колоний и частиц не зависимо от применяемой стратегии упрочнения. В более глубинных 6...4 слоях их размеры практически идентичны.

Установлено, что предварительная оценка размеров колоний и частиц в слоях синтезированных и упрочненных по разным стратегиям образцов имеет достоверные результаты.

Исходя из различных характеров распределения колоний и частиц, можно сделать вывод о неравномерности распределения твердости по исследуемому сечению, которое необходимо исследовать в дальнейшем.

## 3. Выводы

Применение современных технологий и анализа изображений микроструктуры позволяет значительно ускорить и упростить процесс исследования. В результате металлографических исследований с помощью ПО SIAMS микроструктуры деталей, полученных в результате чередования операций наплавки 3DMP-методом и ВТДУ, определены характерные размеры колоний частиц и мелкодисперсных частиц раздробленных дендритов в каждом наплавленном слое, выявлен характер распределения структурных составляющих по сечению образов в направлении наплавки. Необходимо провести дополнительные исследования влияния полученной комбинированной микроструктуры на величину и карту микротвердости.



**Рисунок 3** – Обработка микроструктуры синтезированного образца, с упрочнением каждого 5 слоя в программном комплексе SIAMS: а) исходное фото, б) выделение структурных составляющих; в) результат анализа



**Рисунок 4** – Влияние стратегии упрочнения на микроструктуру выращенной детали из стали 309LSi: а) на длину колоний; б) на длину частиц

# 4. Список источников

- [1] Чичко А.Н, Сачек О.А., Веденеев А.В. Алгоритмы обработки изображений микроструктур сталей для определения межпластиночных расстояний феррита и цементита // Литье и металлургия. 2009. № 1 (50). С. 86–93.
- [2] Конакова И. П., Ананьев А. В. Компьютерный анализ микроструктуры материалов // Новые образовательные технологии в вузе (Екатеринбург, 02 мес. 2007 г.): сб. трудов четвертой международной научно-методической конференции / ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 2007. С. 207-210.
- [3] Куц Ю.В., Повстяной А.Ю. Современные методы исследования микроструктуры с помощью компьютерного материаловедения с использованием прикладных программ // НАУКОВІ НОТАТКИ. 2014. № 45. С. 323–329.
- [4] Problems of analyzing microstructure images in assessing the impact of technological parameters of combined strain wave hardening on the quality of the surface layer / A.V. Kirichek, A.V. Khandozhko, S.O. Fedonina, D.L. Solovyev // CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS 2019. Graphicon 2019 - Proceedings of the 29TH international conference on computer graphics and vision. (Москва, XX мес. 20XX г.). 2019. pp. 261–264.