

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48>

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ ЗАГОТОВОК ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ, ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ И ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Научная статья

Кабалдин Ю.Г.^{1,*}, Аносов М.С.², Иванов С.В.³, Высоколов В.В.⁴, Кротиков Д.А.⁵

^{1,2,3,5} Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация

⁴ АО «ТехСервис», Нижний Новгород, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (uru.40[at]mail.ru)

Аннотация

На основе анализа акустико-эмиссионной информации, полученной авторами, разработана методика прогнозирования структурных изменений и устойчивости структурного состояния нержавеющей стали при растяжении образцов, полученных аддитивным выращиванием. Разработана методика количественной оценки структурных изменений и масштабного уровня деформации в образцах в режиме реального времени. Определены механизмы потери структурной устойчивости металла заготовок, полученных аддитивным выращиванием при деформации растяжением.

Возникновение новой структуры есть следствие самоорганизации [7]. Самоорганизация весьма разнообразна. Особое место занимает ее проявление в диссипативных (рассеивающих энергию) неравновесных средах. Формирование структур при необратимых процессах происходит при определенных условиях: главное из них – наличие качественного скачка при достижении критических (пороговых) значений параметров порядка.

Ключевые слова: аддитивное выращивание заготовок, нержавеющая сталь, термообработка, испытания на растяжение, упруго-пластическая деформация, структурные изменения, масштабные уровни деформации, фрактальный анализ, устойчивость структуры, потеря устойчивости, разрушение.

EVALUATION OF STRUCTURAL CHANGES IN THE METAL OF STAINLESS STEEL BILLETS PRODUCED BY ADDITIVE GROWTH UNDER TENSILE DEFORMATION BASED ON NONLINEAR DYNAMICS AND FRACTAL ANALYSIS APPROACHES

Research article

Kabaldin Y.G.^{1,*}, Anosov M.S.², Ivanov S.V.³, Visokolov V.V.⁴, Krotikov D.A.⁵

^{1,2,3,5} Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁴ JSC "Techservice", Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Corresponding author (uru.40[at]mail.ru)

Abstract

Based on the analysis of acoustic-emission information obtained by the authors, a methodology for predicting structural changes and stability of the structural state of stainless steel during tensile testing of samples obtained by additive growth has been developed. The technique of quantitative evaluation of structural changes and scale level of deformation in samples in real time has been designed. Mechanisms of loss of structural stability of metal billets obtained by additive growth under tensile deformation have been determined.

The emergence of a new structure is a consequence of self-organization [7]. Self-organization is very diverse. Its manifestation in dissipative (energy dissipating) nonequilibrium media takes a special place. The formation of structures in irreversible processes occurs under certain conditions: the main one is the presence of a qualitative jump when critical (threshold) values of order parameters are reached.

Keywords: additive growth of billets, stainless steel, heat treatment, tensile tests, elastic-plastic deformation, structural changes, scale levels of deformation, fractal analysis, structural stability, loss of stability, fracture.

Введение

В настоящее время одним из перспективных методов изготовления изделий сложной формы является 3D-печать металлами.

Применение аддитивных технологий становится все более актуальным для промышленности ввиду снижения общей себестоимости получаемых изделий. Существует ряд технологий аддитивного выращивания (АВ) изделий, среди которых наибольшее развитие получили технологии SLM (лазерное спекание порошков) и WAAM (электродуговая наплавка). Метод SLM обеспечивает получение более высокоточных заготовок изделия, чем метод WAAM, однако стоимость сварочной проволоки дешевле порошка в 2-10 раз. Несмотря на преимущества АВ, практически во всех случаях требуется постобработка – как минимум, это термообработка для снятия напряжений.

Метод WAAM является наиболее производительным (до 15 кг/ч), позволяет изготавливать крупногабаритные изделия и наиболее знаком для отечественного производства, т.к. электродуговая наплавка и сварка применяются практически на любом предприятии, где работают с металлами. Металлургическое качество получаемых изделий с помощью наплавки проволокой заметно выше всех популярных на сегодняшний день аддитивных технологий.

Проволока, в отличие от порошка, имеет гомогенную структуру без оставшихся при его производстве газов, включений частиц с неудовлетворительной морфологией и формой, проблем с недостаточной или избыточной температурой сплавления, и т.п. Высокотемпературная ванна расплава получается достаточно большой и однородной. Удастся достичь относительно низкой пористости наплавленного металла на уровне 0,9-2%, без трещин и несплавлений в зоне термического влияния и с единичными порами.

Научная проблема. Цель работы

Исследование эволюции процесса деформационного упрочнения и разрушения металлов является предметом многочисленных работ. В последние годы развиваются новые представления о процессах деформации и разрушения металлических материалов, в основу которых положено использование положений теории синергетики [1], [3], [4], [5]. В работе [3] твердое тело при деформировании рассматривается как многоуровневая самоорганизующаяся система, в которой механизмы деформации на разных масштабных уровнях органически взаимосвязаны в соответствии с принципом масштабной инвариантности. В процессе механического нагружения эта система эволюционирует и адаптируется к приложенным воздействиям, а элементы ее внутреннего строения (микроструктура) способны к саморегуляции.

В этой связи, актуальной задачей, является разработка таких методик исследования структурных изменений в материалах в процессе деформации, которые могли бы фиксировать эволюционные переходы структурных изменений с более низкого масштабного уровня на более высокий, с количественной оценкой устойчивости структурного состояния.

Одним из методов, представляющих такую возможность, на наш взгляд, является метод акустической эмиссии (АЭ), возможности которого последнее время существенно возросли, благодаря бурному развитию вычислительной техники.

Несмотря на то, что метод АЭ не является прямым методом исследования, он позволяет контролировать структурные изменения в материале в режиме реально времени и отличается высокой чувствительностью к зарождению и развитию дефектов различного уровня. Большинство работ [9], [11], [12], [14] в направлении использования метода АЭ в экспериментальной практике исследования процессов деформации и разрушения металлических материалов посвящено выбору наиболее информативных параметров для однозначной идентификации их с реальными физическими процессами, протекающими в материале.

Согласно [14], метод акустической эмиссии является идеальным способом сбора данных о накопленных повреждениях в конструкции в целом, так как позволяет выявить сразу все развивающиеся дефекты одновременно.

На наш взгляд, кооперативное поведение дефектов в процессе силового нагружения позволяет рассматривать систему активно-развивающихся дефектов как единый фрактал дефектов. С другой стороны, для качественной оценки фрактала дефектов, необходимы информационные элементы, характеризующие процессы структурных перестроений, происходящих под действием внешних условий.

В процессе внешнего силового воздействия металл теряет структурную устойчивость. Параметрами, характеризующими устойчивость структурного состояния металлов, на основе подходов нелинейной динамики, являются D_f фрактальная размерность. В частности, в ряде работ [6], [7], [8] показана связь механических свойств различных металлов с величиной D_f фрактальной размерности.

Таким образом, с позиций современных представлений о процессах деформации и разрушения, твердое тело рассматривается как многоуровневая система, а для анализа структурных изменений используются фрактальные представления.

Отсутствие критериев оценки масштабного уровня деформации и ПО для их расчета по сигналам АЭ, сдерживает ее применения для решения вышеуказанных задач.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева, получило развитие новое научное направление – цифровое материаловедение, включающее подходы нелинейной динамики, искусственного интеллекта и фрактального анализа. В этой связи структуру металла следует рассматривать как динамическую систему.

Параметр D_f фрактальная размерность, по отношению к металлам, будет определять их структурную устойчивость. В частности, он будет определять число степеней свободы, т.е. возможных перемещений зерен структуры в процессе деформации металла. Обычно он ниже двух. Причем, чем ниже фрактальная размерность структуры, тем она устойчивее. Изрезанные границы зерен также фрактальны [7] и обуславливаются дробной размерностью от $2 \leq D_f \leq 3$. Указанные высокие значения фрактальной размерности границ зерен свидетельствуют об их неустойчивости

В настоящей работе рассматривается экспериментальный подход к идентификации структурных перестроек в деформируемом твердом теле на основе подходов нелинейной динамики и фрактального анализа сигналов акустической эмиссии, составляющих основу нового научного направления – цифрового материаловедения на примере исследования структурных изменений в металле заготовок из нержавеющей стали 07X25H13, полученного методом WAAM, до и после термообработки, обеспечивающей повышение механических свойств.

Необходимо отметить, что структурные изменения в металле напечатанных заготовок, из рассматриваемой аустенитной стали 07X25H13, в процессе упруго-пластической деформации, изучена недостаточно. Следовательно, исследование структурообразования в аустенитных сталях, полученных методом электродуговой наплавки (WAAM) при деформации растяжением и с последующей термической обработкой, является актуальными.

Методика исследований

Для исследования эволюции динамики и устойчивости структуры металла образцов из нержавеющей стали 07X25H13, полученных аддитивным выращиванием, были проведены экспериментальные исследования. В качестве оборудования для растяжения образцов была применена разрывная машина Tinius Olsen H100 KU. В ходе каждого

эксперимента, синхронно с процессом деформации образца при растяжении, регистрировались сигналы АЭ с помощью высокоточных датчиков акустической эмиссии GTU200U, GT250, GT350 производства компании Глобал Тест, закрепленных на образцах. Использовались аналого-цифровые преобразователи 4431 и 6356 производства компании National Instruments и персональный компьютер со специально разработанным нами ПО [11].

Для этой цели берется временной ряд сигналов ВАЭ, снятый в процессе деформации образцов. Однако временной ряд, полученный непосредственно с датчиков, помимо полезной информации несет значительную долю шума. Следовательно, перед использованием этого сигнала необходимо выполнить его очистку от шума.

Поскольку в динамике процесса растяжения нас интересует в основном частотно-фазовая характеристика, то очистка сигнала АЭ от шума осуществлялась с помощью алгоритмов, основанных на вейвлет-преобразовании.

На основе полученных сигналов АЭ, используя подходы нелинейной динамики, производилась реконструкция аттракторов динамической системы образцов из металла заготовок, полученных аддитивным выращиванием. Определялась D_f фрактальная размерность и λ_1 показатели Ляпунова с использованием специального программного обеспечения [11].

Структура и механические свойства металла заготовок из нержавеющей стали, полученные аддитивным выращиванием

На рис. 1 показана структура стали 07X25H13, полученная методом WAAM в двух вариантах: без термообработки (ТО) и после аустенизации.

Как следует из рис.1а, в структуре металла заготовки из нержавеющей стали, полученной методом WAAM, выявлена грубая дендритная структура. Дендриты ориентированы нормально к поверхности наплавочного валика, что обусловлено направлением тепловода из-за большой толщины слоя.

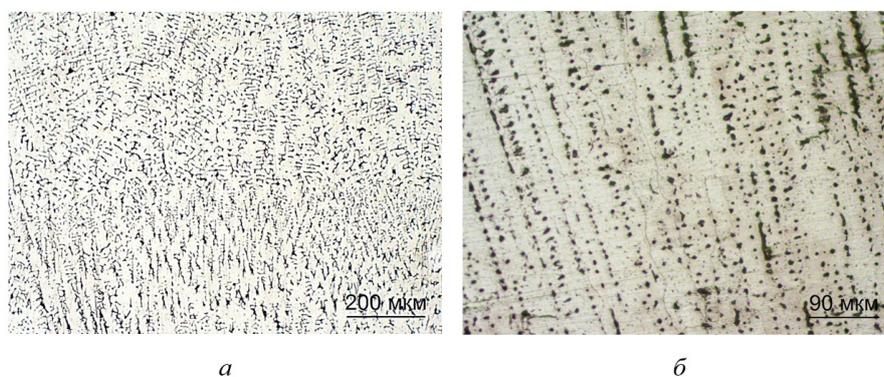


Рисунок 1 - Структура образца после наплавки:
а - x100; б - x200

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48.1>

Дендриты, залегающие в глубине наплавленного металла, имеют более развитое строение границ. Однако в целом структура наплавленного металла схожа с микроструктурой, получаемой в результате кристаллизации аустенитной стали. После аустенизации структура металла заготовок размер дендритов в целом уменьшается относительно микроструктуры после наплавки. Данный эффект свидетельствует о более полном протекании диффузионных процессов при аустенизации. Наблюдается сфероидизация дендритных составляющих с сохранением их общей направленности. Процентное содержание δ -феррита и σ -фазы после данной обработки значительно уменьшается.

В табл. 1 представлены основные механические свойства образцов исследованной стали, в частности, полученной методом WAAM без ТО, и после аустенизации.

Таблица 1 - Механические свойства стали 07X25H13, полученной электродуговой наплавкой, в разных состояниях

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48.2>

Состояние материала	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %
Сталь 07X25H13, после выращивания методом WAAM	581,1	307	47,7
Сталь 07X25H13, после выращивания методом WAAM + аустенизация	503,4	240	51,3

Как видно из табл. 1, термообработка (аустенизация), проведенная после наплавки, повышает пластичность, однако предел прочности снижается.

На рис.2 представлены результаты фрактографического анализа изломов из металла образцов, изготовленных из заготовок после аддитивного выращивания, и из металла образцов, подвергнутых аустенизации (табл. 1), с использованием электронной микроскопии.

Как видно из рис.2, разрушение образцов произошло по вязкому механизму, с образованием характерного ямочного рельефа. Однако на поверхности изломов образца из металла заготовок, полученных аддитивным выращиванием, размеры ямок больше (рис.2а), чем на поверхности изломов образца из металла заготовок после аустенизации (рис.1б).

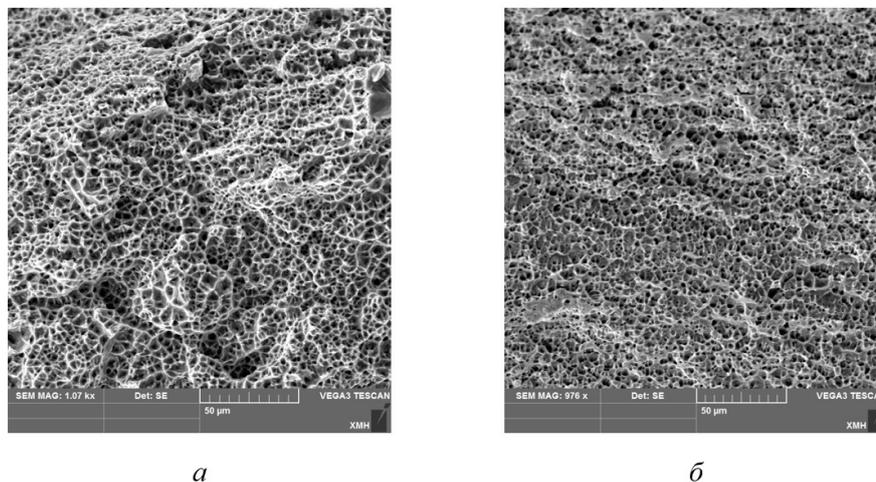


Рисунок 2 - Микрофотографии изломов образцов из стали 07X25H13:
а - после аддитивного выращивания; б - после аддитивного выращивания+ аустенизация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48.3>

Результаты исследований на основе подходов нелинейной динамики и фрактального анализа

Анализ зависимости $D_F \sim t$ при испытании образцов из металла заготовок, полученных электродуговой наплавкой, после реконструкции аттракторов по сигналам АЭ, показывает (рис.3), что на участке упругой деформации динамическая система (структура металла) устойчива.

При переходе к площадке текучести, происходит рост фрактальной размерности. Это начало пластической неустойчивости структуры материала, т.е. первичная бифуркация.

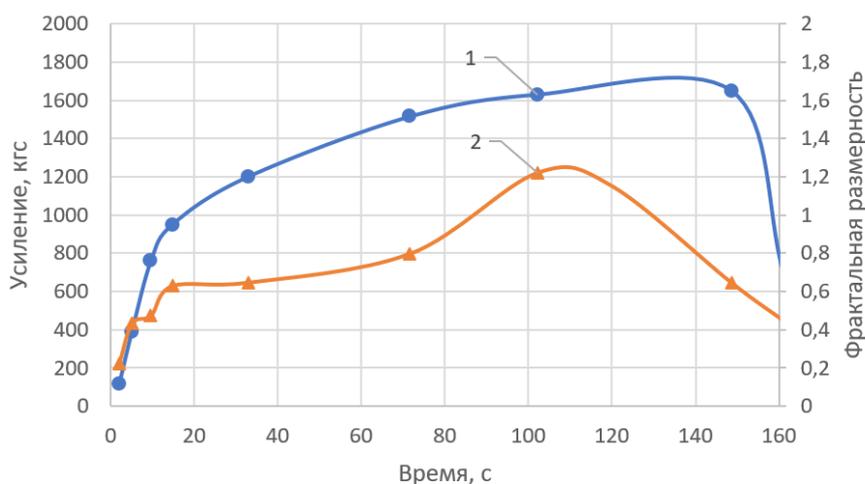


Рисунок 3 - Диаграмма растяжения (1) и зависимость (2) фрактальной размерности от времени в металле образца из стали 07X25H13, полученного методом WAAM
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48.4>

Затем, чем больше деформация образца, тем выше значения D_F . На участке деформационного упрочнения динамическая система металла образца, проявляет наибольшую неустойчивость. Показатель D_F резко возрастает и становится больше 1.

Изменения фрактальной размерности при растяжении образцов, подвергнутых аустенизации, происходят иначе (рис.4).

На стадии упругой деформации D_F также не изменяется. Наблюдается рост D_F на площадке текучести.

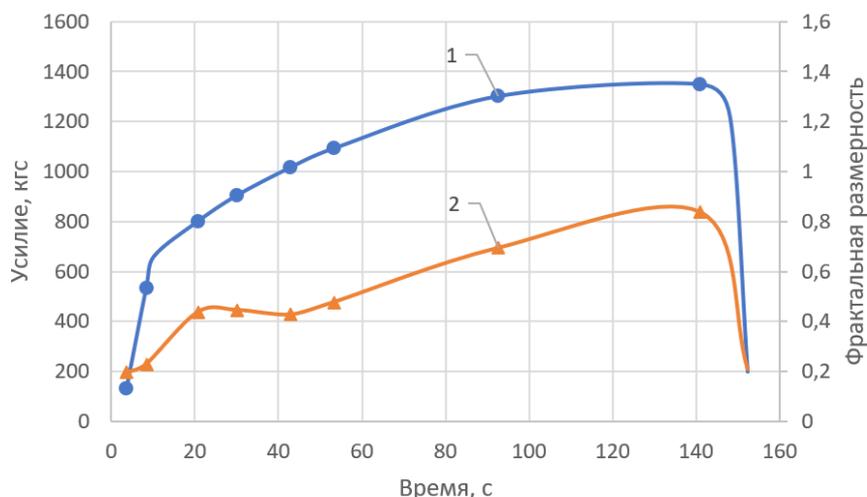


Рисунок 4 - Диаграмма растяжения (1) и зависимость (2) фрактальной размерности от времени в металле образца из стали 07X25H13, полученного методом WAAM + аустенизация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48.5>

В процессе дальнейшей деформации, он практически не изменяется и лишь перед разрушением образца показатель D_F становится близким к 1.

Экспериментальные данные (рис.3 и 4) по оценке фрактальной размерности соответствуют фрактографическим исследованиям (рис.2). В частности, повышение пластичности стали 07X25H13 после ТО, приводит к снижению размеров ямок на поверхностях излома образцов.

Анализ результатов исследований

Структурные изменения в металлах, порождаемые внешним силовым воздействием, обусловлены движением отдельных частиц. Увеличение при этом числа степеней свободы зерен приводит к качественному изменению их динамики. Оценка D_F размерности аттракторов, позволяет определить число переменных мод, формирующих режим пластического течения металла из нержавеющей стали, полученной методом WAAM, при деформации растяжением.

В этой связи можно утверждать, что первичная буфуркация на стадии текучести при растяжении образцов, полученных электродуговой наплавкой из стали 07X25H13, обусловлена одномодовым движением частиц металла, т.е. с наименьшим числом степеней свободы ($D_F < 1$).

В процессе дальнейшей деформации образцов параметр D_F увеличивается. В работе [1], [2] отмечается, что фазовые переходы, сопровождающие образование новых структур при деформации, обусловлены флуктуациями различного уровня. Поэтому можно утверждать, что на фоне однородных флуктуаций, на участке деформационного упрочнения образца (рис.3), имеют место более интенсивные структурные изменения, в частности, перед разрушением образца. Вблизи критических точек всегда наблюдается резкое усиление флуктуации, причем эти флуктуации имеют не только большую амплитуду, но и простираются на большие расстояния. Именно благодаря критическим флуктуациям происходит переход к новым структурам и новым состояниям. Пригожин назвал такой переход «порядок через флуктуации» [1]. Критические структуры, ответственные за разрушение образца, являются крупномасштабными вихревыми структурами [3], т.к. $D_F > 1$.

Таким образом, динамика движения частиц на стадии текучести (рис.3 и 4) имеет меньшие временные и пространственные масштабы на фоне их регулярного движения, чем на стадии деформационного упрочнения. В теории турбулентности такой характер движения принято называть перемежаемостью [5].

С позиций подходов нелинейной динамики, структурные перестройки на участке текучести обусловлены развитием «слабого хаоса» в системе [16]. В работах [3], [4], показано также, что неустойчивости субструктуры, соответствует некоторое критическое значение плотности хаотических дислокаций (или оборванных дислокационных стенок) внутри субструктурных элементов.

С позиций термодинамики открытых систем [1], [2], для перехода системы в новое устойчивое состояние с образованием диссипативных структур необходимо снижение энтропии в системе. Согласно И. Пригожину, предпосылкой для формирования в системе упорядоченных структур является существование определенного соотношения между производством энтропии, обменом энтропии с внешней средой и образованием диссипативных структур. Накопленная S_u^H энтропия в системе:

$$S_u^H = S_u^0 + \dot{S} \times \tau$$

где: S_u^0 – начальная энтропия; \dot{S} – скорость производства энтропии.

Величину S_u^0 характеризует начальная плотность дислокаций в металле. Движущиеся дислокации создают деформацию. Диссипация энергии пластической деформации происходит через элементарные акты зарождения и движения дефектов различного уровня, т.е. накопление латентной энергии дефектов, а также через локальное тепловыделение, вызывая рост тепла и энтропии в системе. Так, известно [17], что тепловая мощность одной

дислокации при разрыве межатомных связей составляет $q_i = 10^{-8}$ ккал/с. Тепловая мощность при ρ критической (1011 см^2) плотности дислокации составит $q_k = 10^8 \cdot \rho^{3/2}$. Общая тепловая мощность источников дислокаций составит:

$$q_o = 10^8 N^{1/3} \varepsilon q_i$$

где: ε – степень деформации, N – плотность исходных источников дислокаций.

Расчеты температуры при указанной выше критической плотности дислокаций в плоскостях скольжения показали, что она может достигать температуры плавления стали. Рост тепла в системе, в свою очередь, обуславливает и увеличение энтропии.

Структурообразование – это сверхкритическое явление. Поэтому, чтобы в системе началось формирование новой структуры, снижение энтропии в системе должно превысить некоторое критическое значение [1].

Из термодинамики необратимых процессов известно также [1], [2], что в равновесном состоянии энтропия в системе максимальна. Такому состоянию должно соответствовать полное отсутствие порядка в пространственном и временном поведении динамической системы. Следовательно, при переходе динамической системы в неустойчивое состояние следует ожидать появления хаоса, в котором осуществляется зарождение элементов новой структуры, а при достижении критического значения плотности элементов наступает самоорганизация. Поэтому на стадии деформационного упрочнения наблюдается рост энтропии.

Неустойчивость структуры возникает как коллективный эффект [1]. Иначе говоря, при увеличении в динамической системе образца степени деформации, на стадии деформационного упрочнения, образуется критическое количество «зародышей» новой структуры, после чего система спонтанно переходит в структурно упорядоченную. Коллективное поведение дефектов проявляется уже на стадии первичной буфуркации, т.е. на стадии текучести металла.

Анализ устойчивости динамической системы образца по λ (показателю Ляпунова) показывает, что они всегда положительны. Наибольшие значения λ – наблюдаются на площадке текучести.

Таким образом, анализ проведенных исследований показывает, что критерием оценки адаптационных свойств структуры металла заготовок, полученного аддитивным выращиванием, и ее устойчивости в процессе силового воздействия, может являться самоподобие фрактальных структур.

Заключение

Разработана методика прогнозирования структурных изменений и устойчивости структурного состояния нержавеющей стали при растяжении образцов, полученных аддитивным выращиванием.

Методика позволяет проводить количественную оценку структурных изменений и масштабного уровня деформации в образцах в режиме реального времени по показателю-фрактальная размерность. Определены механизмы потери структурной устойчивости металла заготовок, полученных аддитивным выращиванием и после их термообработки, при деформации растяжением. Вскрыт механизм повышения механических свойств после термообработки металла заготовок, связанный с уменьшением действия вихревых мод в процессе пластического течения частиц металла при деформации.

Таким образом, разработанная методика позволяет проводить количественную оценку структурных изменений и масштабного уровня деформации металла в образцах в режиме реального времени по показателю-фрактальная размерность сигналов АЭ.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Секачёв А.Ф., Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48.6>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Sekachyov A.F., Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.48.6>

Список литературы / References

1. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И.Р. Пригожин. — М.: Мир, 1973. — 280 с.
2. Николис Г. Структурообразование в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
3. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики / В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. — 1998. — Т1. — №1. — С.61-81.
4. Трефилов В.И. Физические основы прочности тугоплавких металлов / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. — Киев.: Наукова думка, 1975. — 315 с.
5. Маленецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Маленецкий, А.Б. Потапов. — М.: УРСС, 2000. — 336 с.
6. Савенков Г.Г. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение / Г.Г. Савенков, Б.К. Барахтин // ПМТФ. — 2011. — Т. 52. — № 6. — С. 177-184.
7. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин [и др.] — М.: Наука, 1994. — 384 с.
8. Кузнецов П.В. Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов / П.В. Кузнецов, И.В. Петракова, Ю.В. Шрайбер // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7. — № 1. — С. 389-392

9. Пенкин А.Г. Оценка степени повреждаемости конструкционной стали 19Г при статическом и циклическом деформировании с использованием метода АЭ / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев // *Металлы*. — 2004. — № 3. — С. 78-85.
10. Пенкин А.Г. Оценка степени повреждаемости конструкционных сталей / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров // *Деформация и разрушение материалов*. — 2005. — № 2. — С.7.
11. Брагинский А.П. О прогнозировании структурных перестроек в материалах по особенностям коллективного поведения источников АЭ / А.П. Брагинский // *Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов*. — Ленинград, 1987. — С. 55-75.
12. Гайдукович У.П. Акустическая эмиссия развивающихся дефектов с точки зрения синергетики и теории фракталов / У.П. Гайдукович, И.Р. Кузеев // *Тезисы докладов четвертого международного междисциплинарного симпозиума (г. Москва, 14-17 октября 2005 г.)*. — Москва, 2005. — С. 64.
13. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика / С.Ф. Филоненко. — Киев: КМУГА, 1999. — С. 304.
14. Семашко Н.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, В.И. Шпорт [и др.] — Москва: Машиностроение, 2002. — 240 с.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №202366461. Программа для расчета количественных показателей сигнала акустической эмиссии / Кабалдин Ю.Г. [и др.]
16. Заславский Г.М. Слабый хаос и квазирегулярные структуры / Г.М. Заславский, Р.З. Сагдеев, Д.А. Усиков [и др.] — М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит, 1991. — 240 с.
17. Красулин Ю.Л. Тепловыделение на контактных поверхностях в процессах обработки металлов / Ю.Л. Красулин, В.Н. Тимофеев // *Сб. Физико-механические и теплофизические свойства металлов*. — М.: Наука, 1976. — С. 132-136.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Glensdorf P. Termodinamicheskaia teorija struktury, ustojchivosti i fluktuacij [Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations] / P. Glensdorf, I.R. Prigozhin. — М.: Mir, 1973. — 280 p. [in Russian]
2. Nikolis G. Strukuroobrazovanie v neravnovesnyh sistemah [Structure formation in non-equilibrium systems] / G. Nikolis, I. Prigozhin. — М.: Mir, 1979. — 512 p. [in Russian]
3. Panin V.E. Osnovy fizicheskoy mezomehaniki [Fundamentals of physical mesomechanics] / V.E. Panin // *Fizicheskaja mezomehanika [Physical Mesomechanics]*. — 1998. — Vol1. — №1. — P.61-81. [in Russian]
4. Trefilov V.I. Fizicheskie osnovy prochnosti tugoplavkih metallov [Physical bases of strength of refractory metals] / V.I. Trefilov, Ju.V. Mil'man, S.A. Firstov. — Kyiv.: Naukova dumka, 1975. — 315 p. [in Russian]
5. Maleneckij G.G. Sovremennye problemy nelinejnoj dinamiki [Modern problems of nonlinear dynamics] / G.G. Maleneckij, A.B. Potapov. — М.: URSS, 2000. — 336 p. [in Russian]
6. Savenkov G.G. Svjaz' fraktal'noj razmernosti poverhnosti razrushenija s kompleksom standartnyh harakteristik materiala na rastjazhenie [Relation of the fractal dimension of the fracture surface to the complex of standard tensile characteristics of the material] / G.G. Savenkov, B.K. Barahtin // *PMTF*. — 2011. — Vol. 52. — № 6. — P. 177-184. [in Russian]
7. Ivanova V.S. Sinergetika i fraktaly v materialovedenii [Synergetics and fractals in materials science] / V.S. Ivanova, A.S. Balankin, I.Zh. Bunin [et al.] — М.: Nauka, 1994. — 384 p. [in Russian]
8. Kuznecov P.V. Fraktal'naja razmernost' kak harakteristika ustalosti polikristallov metallov [Fractal dimensionality as a characteristic of fatigue of metal polycrystals] / P.V. Kuznecov, I.V. Petrakova, Ju.V. Shrajber // *Fizicheskaja mezomehanika [Physical Mesomechanics]*. — 2004. — Vol. 7. — № 1. — P. 389-392 [in Russian]
9. Penkin A.G. Ocenka stepeni povrezhdaemosti konstrukcionnoj stali 19G pri staticheskom i ciklicheskom deformirovanii s ispol'zovaniem metoda AJe [Estimation of the degree of damageability of structural steel 19G under static and cyclic deformation using the AE method] / A.G. Penkin, V.F. Terent'ev // *Metally [Metals]*. — 2004. — № 3. — P. 78-85. [in Russian]
10. Penkin A.G. Ocenka stepeni povrezhdaemosti konstrukcionnyh stalej [Estimation of the degree of damageability of structural steels] / A.G. Penkin, V.F. Terent'ev, M.B. Bakirov // *Deformacija i razrushenie materialov [Deformation and fracture of materials]*. — 2005. — № 2. — P.7. [in Russian]
11. Braginskij A.P. O prognozirovanii strukturyh perestroek v materialah po osobennostjam kolektivnogo povedenija istochnikov AJe [On prediction of structural rearrangements in materials by the features of collective behaviour of AE sources] / A.P. Braginskij // *Fizicheskie aspekty prognozirovaniya razrushenija i deformirovanija geterogennyh materialov [Physical aspects of prediction of fracture and deformation of heterogeneous materials]*. — Leningrad, 1987. — P. 55-75. [in Russian]
12. Gajdukovich U.P. Akusticheskaja jemissija razvivajushihhsja defektov s tochki zrenija sinergetiki i teorii fraktalov [Acoustic emission of developing defects in terms of synergetics and fractal theory] / U.P. Gajdukovich, I.R. Kuzeev // *Tezisy dokladov chetvertogo mezhdunarodnogo mezhdisciplinarnogo simpoziuma (g. Moskva, 14-17 oktjabrja 2005 g.) [Abstracts of the Fourth International Interdisciplinary Symposium (Moscow, 14-17 October 2005)]*. — Moscow, 2005. — P. 64. [in Russian]
13. Filonenko S.F. Akusticheskaja jemissija. Izmerenie, kontrol', diagnostika [Acoustic emission. Measurement, control, diagnostics] / S.F. Filonenko. — Kyiv: KМУГА, 1999. — P. 304. [in Russian]
14. Semashko N.A. Akusticheskaja jemissija v jeksperimental'nom materialovedenii [Acoustic emission in experimental materials science] / N.A. Semashko, V.I. Shport [et al.] — Moscow: Mashinostroenie, 2002. — 240 p. [in Russian]
15. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM №202366461. Programma dlja rascheta kolichestvennyh pokazatelej signala akusticheskoi jemissii [Certificate of State Registration of Computer Programme

No.202366461. Programme for calculation of quantitative indicators of acoustic emission signal] / Kabaldin Ju.G. [et al.] [in Russian]

16. Zaslavskij G.M. Slabyj haos i kvazireguljarnye struktury [Weak chaos and quasi-regular structures] / G.M. Zaslavskij, R.Z. Sagdeev, D.A. Usikov [et al.] — M.: Nauka. Chief editorial board of physical-mat. lit., 1991. — 240 p. [in Russian]

17. Krasulin Ju.L. Teplovydelenie na kontaktnyh poverhnostjah v processah obrabotki metallov [Heat dissipation on contact surfaces in metal working processes] / Ju.L. Krasulin, V.N. Timofeev // Sb. Fiziko-mehaničeskie i teplofizičeskie svojstva metallov [Coll. Physico-mechanical and thermophysical properties of metals]. — M.: Nauka, 1976. — P. 132-136. [in Russian]