

На правах рукописи

Ильинский Александр Вячеславович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО
ИНДЕНТИРОВАНИЯ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО
АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

***Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий***

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Научный руководитель:

доктор технических наук

Федоров Алексей Владимирович

Официальные оппоненты:

Лебедев Евгений Леонидович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, кафедра контроля качества испытаний вооружения, военной и специальной техники и фотограмметрии, начальник кафедры.

Сташков Алексей Николаевич

кандидат технических наук, институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория магнитного структурного анализа, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – Акционерное общество «Композит», г. Королев, Московская область.

Защита состоится 23 декабря 2020 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106 г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

На сегодняшний день изделия, выполненные по технологиям аддитивного производства, находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Технологии аддитивного производства (далее по тексту - АП) строятся на изготовлении изделия путем послойного добавления материала, что позволяет выполнять сложнопрофильные детали, которые невозможно получить традиционной механообработкой. Одной из технологий АП является технология селективного лазерного спекания (СЛС), суть которой заключается в послойном спекании мелкодисперсных (как правило, металлических) гранул порошка с использованием лазера. В настоящее время изделия, выполненные по данной технологии, повсеместно внедряются в авиационной, ракетно-космической и других ключевых отраслях промышленности. Например, при производстве изделий ракетно-космической техники, сложнопрофильные детали традиционно изготавливаются из жаропрочных сплавов на основе никеля и титана, которые при малейших отклонениях режима технологического процесса склонны к изменению структуры и механических свойств материала. Поэтому достоверный контроль механических свойств таких материалов позволяет гарантированно оценивать качество контролируемого изделия, как в процессе изготовления, так и в процессе его эксплуатации.

Измерение твердости является одним из основных видов испытаний, которое широко применяется при контроле качества изделий, но, в подавляющем большинстве случаев, применение стандартизованных методов измерения твердости требует использования стационарного оборудования и изготовления специальных образцов-свидетелей. В данном случае, под образцом-свидетелем изделия, выполненного СЛС, понимается образец, изготовленный в одном производственном цикле с изделием из того же материала. Однако изготовление таких образцов-свидетелей и контроль с их применением связан с существенными временными и экономическими затратами. Учитывая данный факт, особый интерес

представляют оперативные неразрушающие методы контроля твердости материалов с использованием портативных приборов. Наиболее перспективным с этой точки зрения является метод динамического индентирования (ДИ). Одним из существенных преимуществ метода ДИ является возможность его использования при проведении оперативного контроля твердости материалов изделий, выполненных СЛС, не изготавливая при этом образцов-свидетелей, что, в свою очередь, несет экономическую выгоду. О возможности внедрения метода ДИ свидетельствует ГОСТ Р 58419-2019, в котором отмечена допустимость его использования при проведении контроля твердости изделий из титановых сплавов, полученных СЛС.

Родоначальником метода ДИ является ИПФ НАН Беларуси в лице В.А. Рудницкого, А.П. Креня и др. За годы развития, как самого метода ДИ, так и методов контроля твердости в целом, было опубликовано значительное количество работ широкого круга авторов: А.П. Крень, В.А. Рудницкий, М.С. Дрозд, В.И. Мощенок, Ю.В. Мильман, П.М. Огар, G.M. Pharr, W.C.Oliver и др. Несмотря на современный уровень развития метода и средств ДИ, проблема гарантированного контроля твердости материалов изделий аддитивного производства решена не в полной мере и требует реализации в портативных приборах гибких алгоритмов обработки первичной измерительной информации. Поэтому задача дальнейшего развития метода ДИ и совершенствования алгоритмического и программного обеспечения приборов ДИ видится актуальной.

Цель работы

Целью работы является развитие метода и совершенствование алгоритмического и программного обеспечения приборов динамического индентирования для обеспечения оперативного контроля твердости металлических материалов изделий, получаемых с использованием технологий селективного лазерного спекания, без использования образцов-свидетелей.

Идея работы

Наличие функциональных зависимостей между параметрами контактного ударного взаимодействия и механическими характеристиками материала позволяет усовершенствовать метод

динамического индентирования и разработать новое алгоритмическое и программное обеспечение приборов для измерения твердости материалов изделий.

Задачи исследований:

1. Обосновать применимость метода динамического индентирования для достоверного контроля твердости металлических материалов, в том числе изделий аддитивного производства.

2. Разработать алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее производить переход от исходного сигнала ЭДС к параметрам контактного ударного взаимодействия сферического индентора с испытуемым материалом.

3. Разработать метод оценки объемной динамической твердости, учитывающий взаимосвязь между параметрами контактного ударного взаимодействия и твердостью, а также топографию деформированной поверхности.

4. Провести экспериментальную апробацию разработанных алгоритмов и методов при контроле твердости материалов изделий, в том числе получаемых с использованием технологий селективного лазерного спекания.

Достоверность результатов определяется корректностью постановки задач исследований; обоснованностью принятых допущений и ограничений; применением теоретически и экспериментально обоснованных физико-математических моделей, используемых при расчетах; результатами экспериментальных исследований и их сходимостью с результатами теоретического анализа и компьютерного моделирования; признанием основных положений диссертации широким кругом специалистов при апробировании материалов исследований на конференциях.

Научная новизна работы

1. Предложена и обоснована новая расчетно-экспериментальная модель движения индентора, позволяющая перейти с учетом обоснованных допущений от исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя к аналитическим зависимостям с целью расчета параметров контактного ударного

взаимодействия (временных зависимостей скорости, контактного усилия и глубины внедрения).

2. Предложена и обоснована новая математическая модель расчета значений твердости исследуемого материала на основе параметров контактного ударного взаимодействия, базирующаяся на оценке объемной динамической твердости и позволяющая учитывать топографию деформируемой поверхности, т.е. эффекты прогиба («sink-in») и навал («pile-up»).

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке и апробации алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс оценки основных параметров контактного ударного взаимодействия сферического индентора с упругопластическим полупространством и объемной динамической твердости материалов, создающего возможность оперативного достоверного контроля твердости материалов, в том числе изделий аддитивного производства с использованием метода и средств динамического индентирования.

Методология и методы исследования

Исследования проводились на основе применения теории упругости и пластичности, измерений, методов механики контактного деформирования твердого тела, методов физического и математического моделирования, физического эксперимента, методов статистической обработки результатов экспериментов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Алгоритм обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя, разработанный на основе предложенной расчетно-экспериментальной модели движения индентора, позволяет с учетом обоснованных допущений строить диаграмму зависимости $F(h)$ и определять значения основных параметров контактного ударного взаимодействия сферического индентора с упругопластическим полупространством: скорости движения индентора в момент начала и завершения контактного ударного; продолжительности процессов активного контактного ударного взаимодействия (нагружения) и пассивного контактного ударного взаимодействия (разгружения); максимальной глубины

внедрения индентора и глубины остаточного пластического отпечатка; максимального контактного усилия.

2. Предложенный метод оценки динамической твердости материала позволяет учесть эффекты «sink-in» («прогиб») и «pile-up» («навал»), возникающие при контактном ударном взаимодействии сферического индентора с упругопластическим полупространством, а также позволяет установить взаимосвязь динамической твердости со стандартизованными шкалами твердости и может быть использован для достоверного контроля твердости материалов изделий, в том числе изготовленных методом селективного лазерного спекания.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов определяется корректностью постановки задач исследований; обоснованностью принятых допущений и ограничений; применением теоретически и экспериментально обоснованных физико-математических моделей, используемых при расчетах; результатами экспериментальных исследований и их сходимостью с результатами теоретического анализа и компьютерного моделирования; признанием основных положений диссертации широким кругом специалистов при апробировании материалов исследований на конференциях.

Основные и промежуточные результаты диссертационной работы доложены на IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (г. Новосибирск, 2017 г.); V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (г. Екатеринбург, 2019 г.); XXX Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (г. Екатеринбург, 2017 г.); 11-я Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2018) (г. Суздаль, 2018 г.); I, II, III Международная молодежная конференция «Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения» (г. Санкт-Петербург 2018-2020 г.); VII-VIII Конгресс молодых ученых (КМУ) (г. Санкт-Петербург 2018-2020 г.).

Результаты диссертационной работы использованы при создании в ООО «НТЦ «Эталон» блока неразрушающего контроля качества сложнопрофильных заготовок и изделий, полученных селективным лазерным спеканием в рамках опытно-конструкторской работы «СЛС-НК/Эталон», который нашел применение при разработке технологий аддитивного производства в АО «Композит».

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач теоретических и экспериментальных исследований, формулировке научных положений, планировании и проведении экспериментов, обработке полученных результатов экспериментов, разработке алгоритмов и доказательстве их достоверности.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 15 печатных работах, в том числе в 4 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), из них в 1 статье - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению указанных задач и состоит из введения, четырех разделов и заключения. Общий объем диссертации: 120 страниц печатного текста, список используемых источников из 77 наименований. В основной состав диссертации входят 18 таблиц и 54 рисунка.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и степень ее разработанности, кратко изложено состояние вопроса, определены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе обоснована актуальность применения метода ДИ для контроля твердости металлических материалов АП. Отмечено современное состояние развития метода ДИ в мире и в России, а также выделены области, нуждающиеся в дальнейшем развитии.

Во второй главе предложена расчетно-экспериментальная модель и алгоритм оценки параметров контактного ударного взаимодействия (КУВ) с упругопластическим полупространством, которые в отличие от существующих моделей и алгоритмов рассчитываются согласно аналитическим зависимостям с учетом принятых допущений. На основе расчетно-экспериментальной модели разработано алгоритмическое и программное обеспечение (ПО) «ПО ДИ1», проведена их апробация. Выявлены корреляционные зависимости результатов, полученных с использованием ПО «ПО ДИ1», результатов моделирования процесса ДИ в программной среде ANSYS и результатов существующей экспериментальной модели.

В третьей главе предложен новый подход к оценке динамической твердости, особенность которого состоит в расчете объемной динамической твердости материала с учетом показателя его деформационного упрочнения. Установлены основные соотношения, связывающие параметры КУВ с объемной динамической твердостью материала, и на их основе разработано алгоритмическое и программное обеспечение для прибора ДИ. Экспериментальная апробация разработанных моделей и алгоритмов подтвердила работоспособность и адекватность получаемых результатов. Представлена модель количественной взаимосвязи чисел объемной динамической твердости со стандартизованными статическими числами твердости по Бринеллю.

В четвертой главе представлены анализ источников неопределенности измерений твердости и результаты экспериментальной апробации разработанных моделей и алгоритмов при контроле твердости материалов изделий селективного лазерного спекания. Проведен анализ точностных характеристик метода динамического индентирования при определении твердости жаропрочных сплавов изделий, выполненных СЛС.

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с поставленной целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Алгоритм обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя, разработанный на основе предложенной расчетно-экспериментальной модели движения индентора, позволяет с учетом обоснованных допущений строить диаграмму зависимости $F(h)$ и определять значения основных параметров контактного ударного взаимодействия сферического индентора с упругопластическим полупространством: скорости движения индентора в момент начала и завершения контактного ударного; взаимодействия продолжительности процессов активного контактного ударного взаимодействия (нагружения) и пассивного контактного ударного взаимодействия (разгрузки); максимальной глубины внедрения индентора и глубины остаточного пластического отпечатка; максимального контактного усилия.

Сущность метода ДИ и его приборной реализации заключается в следующем: индентор, жестко сцепленный с постоянным магнитом, внедряясь в упругопластическое полупространство, проходит через катушку индуктивности, тем самым создавая в последней сигнал ЭДС, который, в свою очередь, пропорционален скорости движения индентора на всем временном интервале его КУВ.

При обработке исходного сигнала ЭДС осуществляется выделение информативного участка КУВ и переход от временной зависимости ЭДС $\varepsilon(t)$ (рисунок 1а) к временной зависимости $V(t)$ (рисунок 1б) согласно формуле (1):

$$V(t) = \frac{\varepsilon(t)}{k}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

На рисунке 1 использованы следующие обозначения: ε_0 и V_0 – ЭДС и скорость движения индентора в момент времени t_0 , начала контакта индентора с испытуемым материалом; ε_2 и V_2 – ЭДС индукции и скорость движения индентора в момент времени t_2 , завершения контакта индентора с испытуемым материалом.

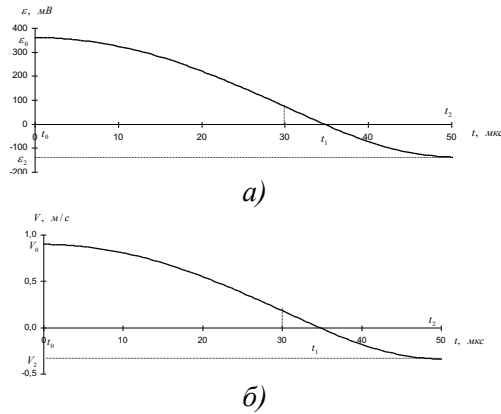


Рисунок 1 – Типовые графики зависимостей: а) $\varepsilon(t)$, б) $V(t)$

Дальнейший переход к временным зависимостям контактного усилия $F(t)$ и глубины внедрения $h(t)$ производится по формулам (2) и (3):

$$F(t) = -m \frac{dV(t)}{dt}; \quad (2)$$

$$h(t) = \int_{t_0}^t V(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где m – масса ударника; t_0 – время начала контактного ударного взаимодействия индентора и испытуемого материала.

На основании данных зависимостей строится график зависимости контактного усилия от глубины внедрения индентора $F(h)$ и определяются значения основных параметров КУВ: h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора; F_{hmax} – контактное усилие, при h_{max} ; h_p – остаточная глубина внедрения индентора (рисунок 2).

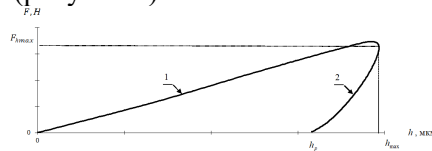


Рисунок 2 – График зависимости $F(h)$:

1 – кривая нагружения, 2 – кривая разгружения

Анализ графика зависимости $F(h)$ показал отсутствие характерного «острого пика», однозначно определяющего углы

наклона кривых нагружения и разгрузки при максимальной глубине внедрения индентора h_{max} , значение которой является определяющим в оценке уровня упругопластической деформации материала, и тем самым возможности получения «строгих» аналитических выражений для функций $V(t)$, $F(t)$, $h(t)$.

Кривые нагружения 1 и разгрузки 2 (рисунок 2) описываются выражениями (4) и (5):

$$F_1(h) = c_1 h^{\alpha_1}; \quad (4)$$

$$F_2(h) = c_2 (h - h_p)^\beta, \quad (5)$$

где c_1, c_2 – константы, характеризующие испытуемый материал; α_1, β – показатели степени, зависящие от характера взаимодействия и геометрии (формы) индентора.

Учитывая выражения (4) и (5) и принимая допущения: об однородности и изотропности тела, подвергаемого упругопластическому деформированию; об отсутствии остаточных напряжений, адиабатического нагрева, трения, термического размягчения, локализации деформации и фазовых превращений в испытуемом материале, движение сферического индентора на этапах нагружения и разгрузки можно описать дифференциальными уравнениями (6) и (7):

$$m\ddot{h} + c_1 h = 0, \text{ при } 0 < t \leq t_1; \quad (6)$$

$$m\ddot{h} + c_2 (h - h_p)^{1.5} = 0, \text{ при } t_1 < t \leq t_2, \quad (7)$$

где $\ddot{h} = \frac{d^2 h}{dt^2}$ – ускорение движения индентора.

Решая дифференциальные уравнения (6) и (7), была получена расчетно-экспериментальная модель движения индентора в виде аналитических зависимостей (8) – (13):

$$V(t) = V_0 \cos\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}} t\right), \text{ при } 0 < t \leq t_1; \quad (8)$$

$$V(t) = \frac{\varepsilon(t)}{k}, \text{ при } t_1 < t \leq t_2; \quad (9)$$

$$h(t) = V_0 \sqrt{\frac{m}{c_1}} \sin\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}} t\right), \text{ при } 0 < t \leq t_1; \quad (10)$$

$$h(t) = (1,25m(V_2^2 - V(t)^2)/c_2)^{0.4} + h_p, \text{ при } t_1 < t \leq t_2; \quad (11)$$

$$F(t) = mV_0 \sqrt{\frac{c_1}{m}} \sin\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}} t\right), \text{ при } 0 < t \leq t_1; \quad (12)$$

$$F(t) = c_2 \cdot (h(t) - h_p)^{1.5}, \text{ при } t_1 < t \leq t_2, \quad (13)$$

которые позволили определить значения основных параметров КУВ и составили основу для разработки алгоритмического и программного обеспечения «ПО ДИ1» обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя.

Соответствующие выражения для расчета F_{max} , h_{max} , h_p , c_1 , c_2 имеют вид (14) – (18):

$$F_{max} = mV_0 \sqrt{\frac{c_1}{m}}; \quad (14)$$

$$h_{max} = V_0 \sqrt{\frac{m}{c_1}}; \quad (15)$$

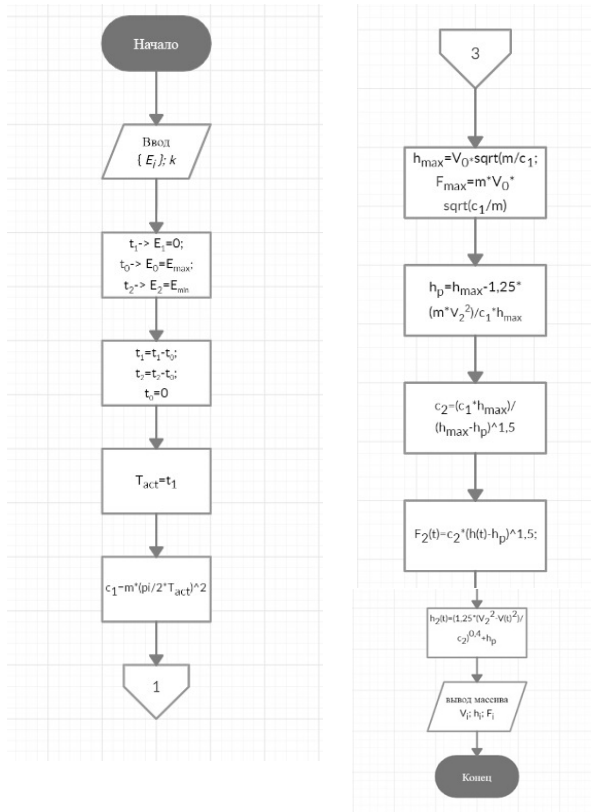
$$h_p = h_{max} - 1,25 \frac{mV_0^2}{c_1 h_{max}}; \quad (16)$$

$$c_1 = m \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot \tau_{act}} \right)^2; \quad (17)$$

$$c_2 = \frac{c_1 h_{max}}{(h_{max} - h_p)^{1.5}}. \quad (18)$$

Фрагменты начала и окончания алгоритма обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя представлены на рисунке 3.

Апробация разработанной расчетно-экспериментальной модели, а также алгоритма, с целью анализа их точностных характеристик при определении значений параметров КУВ, проводилась при ударном индентировании мер твердости по Бринеллю (номинальные значения твердости 66НВ, 101НВ, 383НВ) с использованием экспериментальной установки КУВ в составе: 1 - датчик ДИ с параметрами ударника: $V_0 = 0,9$ м/с, $R = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м, $m = 4,8 \cdot 10^{-3}$ кг, 2 – прибор ДИ «ИСПГ-1», 3 - цифровой осциллограф Rohde Schwarz, 4 – персональный компьютер (ПК) с ПО «ИСПГ-1», 5 - ПК с ПО «ПО ДИ1» (рисунок 4).



а) б)
 Рисунок 3 – Фрагменты блок-схемы алгоритма:
 а) начало алгоритма; б) конец алгоритма

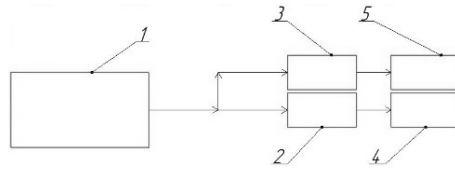


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки КУВ

Сравнительный анализ полученных значений параметров КУВ (рисунок 5) проводился путем определения автокорреляции

остатков с использованием критерия Дарбина-Уотсона. Максимальное расхождение значений параметров КУВ при ударном индентировании для всех мер твердости не превысило 1,5 %.

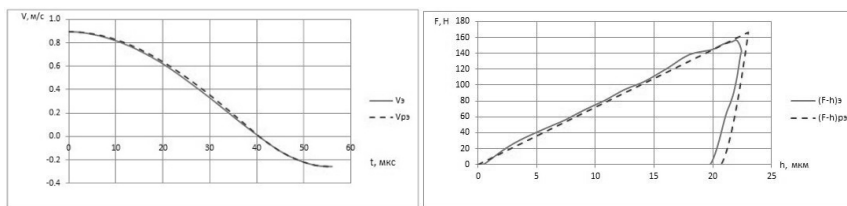


Рисунок 5 – Графики зависимостей для меры твердости 101HV:
 а) $V(t)$, б) $F(h)$: $V_{\text{э}}$ – экспериментальная модель;
 $V_{\text{рэ}}$ – расчетно-экспериментальная модель

Также была произведена оценка погрешности определения значения глубины остаточного отпечатка индентирования h_p . Опорные значения h_p определялись методом измерения глубины отпечатка с использованием оптического цифрового микроскопа Zeiss AxioScore A1. Максимальная суммарная погрешность определения глубины остаточного отпечатка индентирования h_p на всех мерах твердости составила 0,88 мкм.

2. Предложенный метод оценки динамической твердости материала позволяет учесть эффекты «sink-in» («прогиб») и «pile-up» («навал»), возникающие при контактом ударном взаимодействии сферического индентора с упругопластическим полупространством, а также позволяет установить взаимосвязь динамической твердости со стандартизованными шкалами твердости и может быть использован для достоверного контроля твердости материалов изделий, в том числе изготовленных методом селективного лазерного спекания.

Согласно ГОСТ Р 56474-2015 расчет динамической твердости материала производится по формулам (19) или (20):

$$HD_{IT}^{(S)} = \frac{F_{hmax}}{2\pi R h_p}, \quad (19)$$

$$HD_{IT}^{(S)} = \frac{F_{hmax}^2}{2\pi Rm(V_0^2 - V_2^2)}, \quad (20)$$

и по сущности состоит в оценке поверхностной динамической твердости.

Для снятия неопределенности в определении значения F_{hmax} (F_{max}) (рисунок 5б) на основании расчетно-экспериментальной модели (формула (14)), оценку динамической твердости предложено проводить на основе расчета объемной динамической твердости в соответствии с выражением (21):

$$HD_{IT}^{(V)} = \frac{m(V_0^2 - V_2^2)}{\pi h_p^2 (R_p - \frac{1}{3}h_p)}, \quad (21)$$

где R_p – радиус кривизны поверхности остаточного отпечатка.

Для корректного определения радиуса кривизны поверхности восстановленного отпечатка R_p необходимо учитывать не только радиус индентора R , но и характер деформации испытуемого материала, т.е. эффекты «sink-in» («прогиб») и «pile-up» («навал»), о которых можно судить по значению характеристики $C^2 = h_c/h_{max}$ (где h_c – контактная глубина внедрения индентора). Значение характеристики C^2 в значительной степени зависит от значений показателя деформационного упрочнения (экспоненты упрочнения) материала n . Для расчета значений характеристики C^2 предложено использовать выражение (22):

$$C^2 = \frac{5}{2} \left(\frac{2 - n^{st}}{n^{st} + 4} \right), \quad (22)$$

где n^{st} – показатель деформационного упрочнения при статическом нагружении.

Для связи значений показателя деформационного упрочнения при статическом нагружении n^{st} с значениями показателя деформационного упрочнения при динамическом нагружении n^d предложено использовать формулу (23):

$$n^d \approx \frac{n^{st}}{\lg\left(30/\tau_{act}^d\right)}, \quad (23)$$

где τ_{act}^d – длительность процесса динамического (ударного) нагружения.

В свою очередь, значение показателя деформационного упрочнения при динамическом нагружении n^d можно определить непосредственно по зависимости $F(h)$, используя степенной закон Холломоны.

В результате были получены следующие уточненные выражения для расчета объемной динамической твердости:

– при эффекте «прогиб» (24):

$$HD_{IT}^{(V) \text{sink-in}} = \frac{m(v_0^2 - v_2^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right)}, \quad (24)$$

– при эффекте «навал» (25):

$$HD_{IT}^{(V) \text{pile-up}} = \frac{m(v_0^2 - v_2^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} (C^2 - 1) + C^2 - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right)}. \quad (25)$$

Метод оценки объемной динамической твердости вошел в основу разработки программного обеспечения, которое в свою очередь дополнило ПО «ПО ДИ1» в части перехода от значений параметров КУВ к значениям объемной динамической твердости.

Сравнительный анализ результатов оценок динамической твердости, полученных на основе предложенного метода (выражения (24) и (25)), и метода, который регламентирован ГОСТ Р 56 474-2015 (выражения (19) и (20)), проводился при ударном индентировании мер твердости по Бринеллю (номинальные значения твердости 66НВ, 101НВ, 383НВ) и показал их тесную корреляционную связь (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9847$), при этом выборочное стандартное отклонение значений объемной динамической твердости существенно ниже выборочного стандартного отклонения значений поверхностной динамической твердости. Для перехода от чисел объемной динамической твердости к стандартизованным статическим числам твердости по Бринеллю предложено использовать зависимость в виде (26):

$$HB = \frac{HD_{IT}^{(v)} - K \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}(d)}{\dot{\varepsilon}(st)} \right)}{\eta \cdot g}, \quad (26)$$

где η – коэффициент динамичности; g – ускорение свободного падения; K – коэффициент, являющийся функцией свойств контролируемого материала, а также его кристаллической структуры;

$\dot{\varepsilon}^{(d)}, \dot{\varepsilon}^{(st)}$ – скорости деформаций при динамическом и статическом внедрении соответственно.

Для апробации и анализа точностных характеристик метода ДИ при определении твердости жаропрочных сплавов изделий, выполненных СЛС, были проведены экспериментальные исследования. В качестве объектов исследования выступили сложнопрофильные изделия из титанового (образец СЛС 1) и никелевого (образец СЛС 2) сплавов, внешний вид которых приведен на рисунке 6.

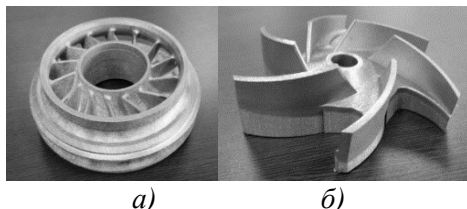


Рисунок 6 – Внешний вид объектов исследования
а) образец СЛС 1, б) образец СЛС 2

Опорные значения твердости определялись на образцах, вырезанных из изделий, методом измерения твердости по Бринеллю (ГОСТ 9012-59) с использованием твердомера Struers Duramin-3000. Коэффициенты K , учитывающие свойства и кристаллическую структуру титанового и никелевого сплавов были получены экспериментально. Относительные погрешности определения твердости по Бринеллю материалов образцов СЛС 1 и СЛС 2 составили соответственно 6% и 7%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей диссертационной работы, представляющей собой законченную научно-квалифицированную работу, на основе совершенствования метода динамического индентирования и средства контроля твердости решена актуальная научно-техническая задача – повышение точности измерений при контроле твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты:

1. Обоснована актуальность применения метода динамического индентирования для достоверного контроля твердости металлических материалов изделий, в том числе изделий аддитивного производства, при этом отмечены области метода, нуждающиеся в дальнейшем развитии.

2. Предложена расчетно-экспериментальная модель движения индентора, разработан алгоритм и программное обеспечение, позволяющие производить переход от исходного сигнала ЭДС, получаемого с магнитоиндукционного преобразователя, к параметрам контактного ударного взаимодействия сферического индентора с испытываемым материалом.

3. Разработан метод экспериментальной оценки объемной динамической твердости, учитывающий топографию деформационной поверхности, для перехода от объемной динамической твердости к статической твердости по Бринеллю предложено использовать аналитическую зависимость, учитывающую скорость деформации и форму кристаллической решетки материала.

4. Результаты экспериментальной апробации разработанных алгоритмов и методов показали возможность их применения для контроля твердости материалов изделий, в том числе получаемых с использованием технологий селективного лазерного спекания. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, показал на возможность применения разработанных моделей и алгоритмов при расчете значений объемной динамической твердости на реальных изделиях аддитивного производства.

5. Перспективными разработками данной темы являются разработки, связанные с созданием специализированного датчика и первичного преобразователя, конструкция которых будет учитывать специфические особенности материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям.

6. Развитием настоящей темы диссертационных исследований видится создание прибора динамического индентирования полностью российского производства, который в

числе прочего будет базироваться на алгоритмическом и программном обеспечении, созданного в рамках настоящей диссертационной работы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Егоров, Р.А. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования / Р.А. Егоров, А.В. Ильинский, М.В. Кузьмичев, А.В. Федоров // Дефектоскопия – 2020. - №6. – с. 61-69.

2. Ильинский, А.В. Исследование динамической твердости конструкционных металлических материалов / А.В. Ильинский, А.В. Федоров, К.А. Степанова, И.Ю. Кинжагулов, И.О. Краснов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86. - № 1. – С. 57-61.

3. Ильинский, А.В. Оценка возможности применения оптического метода в задаче регистрации кинематических характеристик процесса динамического индентирования / А.В. Ильинский, Е.И. Иванова, А.В. Федоров, Н.В. Астрединова, Д.С. Ашихин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2017. - Т. 17. - № 4(110). - С. 620-627.

4. Попович, А.А. Применение лазерно-ультразвукового метода для исследования характеристик изделий, полученных аддитивными технологиями / Д.В. Масайло, В.Ш. Суфияров, Е.В. Борисов, И.А. Полозов, В.А. Быченко, И.Ю. Кинжагулов, И.В. Беркутов, Д.С. Ашихин, А.В. Ильинский // Дефектоскопия - 2016. - № 6. - С. 3-10. (Popovich, A.A. A laser ultrasonic technique for studying the properties of products manufactured by additive technologies / A.A. Popovich, D.V. Masaylo, V. Sufiiarov, E.V. Borisov, I.A. Polozov, V.A. Bychenok, I.Y. Kinzhagulov, I.V. Berkutov, D.S. Ashikhin, A.V. Il'inskii // Russian Journal of Nondestructive Testing. - 2016. - Vol. 52. - N. 6. - PP. 303-309) (Scopus, Web of Science).