

## ОТЗЫВ

**официального оппонента, доктора технических наук, профессора, Лебедева Евгения Леонидовича на диссертацию Ильинского Александра Вячеславовича на тему «Совершенствование метода динамического индентирования и средств контроля твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий**

### **Актуальность темы диссертации**

Массовое внедрение киберфизических систем в производство в XXI веке затронуло различные отрасли мировой промышленности. В числе прочего в настоящее время активно применяются и продолжают внедряться аддитивные технологии, основанные на послойном «выращивании» изделия. Несмотря на постоянное совершенствование данных технологий, контроль свойств материалов «выращиваемых» изделий, и прежде всего механических свойств ответственных металлических элементов авиационных и ракетно-космических изделий, остается в приоритете. При оценке механических свойств материалов изделий, как при производстве, так и при эксплуатации, широко применяются методы контроля их твердости. При этом следует отметить, что традиционные («классические») методы контроля твердости материалов (по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу и пр.) требуют использования стационарного оборудования и специальных образцов. Поэтому актуальным становится применение методов, основанных на использовании портативных приборов, которые позволяют достаточно оперативно и с требуемой достоверностью провести контроль твердости материала непосредственно на изделии.

Одним из таких методов является метод динамического индентирования (ДИ), становлению и развитию которого посвящены работы В.А. Рудницкого, А.П. Креня и др. Однако, несмотря на современный уровень развития метода и средств ДИ, а также и других методов и средств контроля твердости материалов, в том числе динамических, которым посвящены работы К.В. Гоголинского, М.М. Матлина, В.М. Матюнина, Ю.В. Мильмана, П.М. Огара, В.А. Сясько и др. проблема гарантированного и оперативного контроля твердости материалов изделий решена

№ 530-9  
от 10.12.2020

не в полной мере и требует реализации в портативных приборах гибких алгоритмов обработки первичной измерительной информации. Поэтому **тема диссертации Ильинского А.В.**, посвященная совершенствованию метода ДИ и средств контроля твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям, а именно с использованием технологии селективного лазерного спекания, **является** своевременной и **актуальной**.

Диссертационная работа Ильинского А.В. имеет как научную, так и практическую значимость в этом направлении, а задачи, решаемые автором защищаемой диссертации, непосредственно направлены на повышение качества продукции и заслуживают внимания в условиях современного развития науки и техники, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

**Содержание работы** построено в соответствии с решением поставленных задач. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении автор обосновывает актуальность темы работы, определяет ее цель и задачи, формулирует идею работы, раскрывает научную новизну работы, теоретическую и практическую ценность ее результатов.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния аддитивного производства, в частности, метода селективного лазерного спекания. Обоснована актуальность применения метода динамического индентирования для контроля твердости материалов изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления. Отмечены области применения метода, его современное состояние, а также перспективы развития.

Во второй главе по предложенным аналитическим зависимостям разработана модель оценки параметров индентирования, которая позволяет в каждый момент времени оценивать такие параметры, как скорость индентора, контактное усилие и глубину индентирования. Приведены результаты апробации модели с использованием программного обеспечения, созданного на ее основе. Результатами апробации установлена возможность использования модели и алгоритмического обеспечения для достоверной оценки параметров индентирования.

В третьей главе предложен подход к оценке твердости материалов, основанный на учете работы, затрачиваемой на внедрение индентора в контролируемый материал, и объема сформированного отпечатка индентирования. При этом учитывается топография деформируемой поверхности.

В четвертой главе представлены результаты апробации разработанных алгоритмов и методов применительно к изделиям аддитивного производства. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами измерения твердости по Бринеллю.

В заключении представлены основные научные результаты работы. В приложении приведено Заключение о внедрении результатов диссертационного исследования.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна**

На основе анализа состояния проблемы контроля твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям, а именно твердости металлических материалов изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления, а также детального анализа существующих методов и средств для контроля твердости металлических материалов автор обоснованно и корректно сформулировал цель и взаимосвязанные задачи исследований.

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. Данный выбор является обоснованным и методически правильным.

В процессе исследований автором были получены следующие основные научные результаты:

- 1) алгоритм обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя, позволяющий 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) метод оценки динамической твердости материала, который позволяет учитывать топографию деформированной поверхности, т.е. эффекты «sink-in» («прогиб») и «pile-up» («навал»), возникающие при контактном ударном взаимодействии сферического индентора с упругопластическим полупространством, а также осуществить переход от динамической твердости к стандартизированной шкале твердости по Бринеллю, и может быть использован для достоверного контроля твердости материалов изделий, в том числе изготовленных методом селективного лазерного спекания.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, выводов и рекомендаций определяется корректностью постановки задач исследований; применением теоретически и экспериментально обоснованных физико-математических моделей, используемых при расчетах; результатами экспериментальных исследований и их сходимостью с результатами теоретического анализа; признанием основных положений диссертации широким кругом специалистов при апробировании материалов исследований на конференциях, а также результатами внедрения разработанных модели, методики и алгоритма.

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.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в следующем:

1. Разработаны новые расчетно-экспериментальная модель и алгоритм оценки параметров контактного ударного взаимодействия сферического индентора с упругопластическим полупространством, которые в отличие от существующих моделей и алгоритмов рассчитываются согласно аналитическим зависимостям с учетом обоснованных допущений.

2. Предложена и обоснована модель оценки твердости материала, в которой в отличие от известных моделей отражается не только взаимосвязь параметров контактного ударного взаимодействия с объемной динамической твердостью материала, но и учитывается топография деформируемой поверхности, зависящая от показателя деформационного упрочнения материала.

**Теоретическое и прикладное значение результатов диссертационной работы** заключается в том, что разработанные модели и алгоритмы вносят вклад в совершенствование динамических методов контроля твердости материалов, а их применение позволяет обеспечить оперативный и достоверный измерительный контроль твердости титановых и никелевых сплавов изделий, изготовленных методом селективного лазерного спекания. Следует отметить, что основные теоретические и прикладные результаты работы ориентированы, в конечном счете, на повышение качества продукции. Основные результаты работы реализованы в ООО «НТЦ «Эталон», о чем свидетельствует Акт о внедрении результатов диссертационного исследования. Данные результаты в дальнейшем могут быть использованы при создании и внедрении приборов ДИ, разработке технологий контроля механических свойств материалов и изделий.

**При ознакомлении с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:**

1. Из текста диссертации неясно, каким образом при обработке исходного сигнала ЭДС осуществляется выделение информативного участка ударного контактного взаимодействия индентора с испытываемым материалом.

2. В тексте диссертации отсутствует выражение для определения коэффициента пропорциональности  $k$ , точность значения которого существенным образом влияет на погрешность оценки твердости материала.

3. Из текста диссертации неясно, каким образом с использованием микроскопа определялась глубина остаточного отпечатка индентирования.

4. Из текста диссертации неясно, в чем состоит неопределенность в определении значения контактного усилия при максимальной глубине внедрения индентора и как это сказывается на точности оценки динамической твердости.

5. В тексте диссертации не показано, каким образом из диаграммы  $F(h)$  производится оценка показателя деформационного упрочнения материала.

6. Согласно ГОСТ Р 56474-2015 метод динамического индентирования позволяет определять не только динамическую твердость, но динамический модуль упругости, но автором работы на этом факте не акцентируется должного внимания.

Из замечаний редакционного и оформительского характера следует отметить следующие:

1. Отсутствие библиографических ссылок для рисунков 1.5, 1.6, 1.13 и т.д.
2. Оформление списка литературы имеет незначительные отступления от требований ГОСТа.

Приведенные выше недостатки и замечания не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку диссертационной работы.

Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации, которая обладает внутренним единством, и позволяет составить целостное представление о проделанной работе. Материалы диссертации изложены достаточно грамотно, логически последовательно и представлены в лаконичной форме.

### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертация Ильинского А.В. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научно задачи, заключающейся в совершенствовании метода динамического индентирования и разработке алгоритмического и программного обеспечения приборов динамического индентирования. Решение

данной задачи имеет существенное значение для обеспечения оперативного и достоверного контроля твердости металлических материалов изделий, получаемых с использованием аддитивных технологий, и направленно на повышение качества продукции.

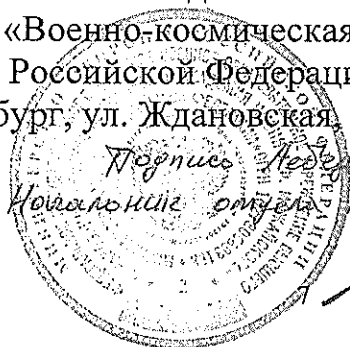
Диссертация «Совершенствование метода динамического индентирования и средств контроля твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», утвержденного приказом ректора Горного университета от 26.06.2019 № 839адм., а ее автор – Ильинский Александр Вячеславович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Официальный оппонент,  
Доктор технических наук, профессор,  
Начальник кафедры контроля качества  
испытаний вооружения, военной  
и специальной техники и фотограмметрии  
Федерального государственного бюджетного  
военного образовательного учреждения  
высшего образования «Военно-космическая  
академия имени А.Ф. Можайского»  
Министерства обороны Российской Федерации

« 19 » 11 2020 года

Лебедев Евгений Леонидович

Федеральное государственное бюджетное военное образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации,  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.  
тел. 8 (812) 347-95-11,  
[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)



Подпись Лебедев Евгений Леонидович заверяю.  
Начальник отдела кадров ВКА имени А.Ф. Можайского  
В. Плотников