

АППАРАТНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2020 г. Р.А. Егоров^{1,*}, А.В. Ильинский^{1,**}, М.В. Кузьмичев^{1,***}, А.В. Федоров^{1,2,****}

¹Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49

²Учреждение науки ИКЦ СЭКТ, Россия 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57-А, пом. 141-Н
E-mail: *roman1465@yandex.ru; **allill003@mail.ru; ***kuzmichev.m92@gmail.com; ****afedor62@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.02.2020; после доработки 23.04.2020

Принята к публикации 12.04.2020

Представлены результаты разработки и апробации алгоритма обработки измерительного сигнала, получаемого с первичного преобразователя при динамическом индентировании. Приведен сравнительный анализ использования показателей динамической твердости. Рассмотрены поверхностный и объемный подходы к оценке динамической твердости. В рамках экспериментальных исследований приведен их сравнительный анализ. Отмечены и обоснованы преимущества использования объемного подхода при оценке динамической твердости с использованием метода динамического индентирования.

Ключевые слова: твердость материала, алгоритмы, обработка сигнала, первичный преобразователь, датчик.

DOI: 10.31857/S0130308220060068

ВВЕДЕНИЕ

Контроль твердости — один из основных видов механических испытаний материалов, который применяется при контроле качества как в производстве, так и при эксплуатации ответственных изделий в различных областях промышленности, в том числе в ракетно-космическом производстве. Обеспечение заданного качества изделий ракетно-космической техники, выполненных по аддитивным технологиям, в настоящее время является весьма актуальной задачей.

На сегодняшний день для контроля твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям, в основном применяют разрушающие методы контроля. В числе прочих следует выделить традиционные методы: Роквелла, Виккерса, Бринелля и др. [1]. Однако, являясь образцовыми, они имеют свои известные недостатки. Вместе с тем в настоящее время интенсивно развиваются и безобразцовые методы контроля, в том числе метод динамического индентирования (ДИ), главным достоинством которого является возможность оперативной оценки твердости материалов изделий без использования образцов-свидетелей [2].

С развитием вычислительных устройств и электронной элементной базы метод ДИ приобретает новые возможности и преимущества перед другими методами неразрушающего контроля механических свойств материалов изделий. Разработка алгоритмического, программного и технического обеспечения является важным направлением в развитии метода динамического индентирования.

Целью настоящего исследования является повышение точности оценки твердости металлов и сплавов с использованием метода динамического индентирования.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОГО СИГНАЛА

Метод ДИ на сегодняшний день регулируется ГОСТ Р 56474—2015. Суть данного метода заключается в ударном контактом взаимодействии жесткого индентора с заданной начальной кинетической энергией с испытуемым материалом и одновременной регистрацией данного процесса. Под регистрацией процесса подразумевается непрерывное определение изменения скорости движения индентора во времени ($V(t)$), а в дальнейшем и определение изменения глубины внедрения индентора $h(t)$ и контактного усилия индентора с материалом $F(t)$ [3]. В основе определения изменения скорости движения индентора лежит магнитоиндукционный метод, заключающийся в измерении электродвижущей силы (ЭДС), наводимой в катушке индуктивности датчика, в результате помещения в нее системы индентирования ударника, а именно индентора и жестко сцепленного с ним магнита.

Основное достоинство такого типа датчиков состоит в том, что их выходной сигнал ЭДС $\varepsilon(t)$ в допустимом приближении можно считать линейно зависимым от скорости внедрения индентора:

$$\varepsilon(t) = kV(t), \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, который зависит от конструктивных параметров преобразователя [4].

В данном исследовании для получения первичного измерительного сигнала ЭДС применялся датчик, входящий в состав существующего прибора ДИ [5]. При этом сигнал с датчика подавался на вход осциллографа LeCroy Corporation WaveRunner WR 44Xi-A.

Оцифровка сигналов проводилась с частотой дискретизации в 5 МГц. Объектом контроля выступила мера твердости по Бринеллю 66НВ. В общей сложности на объекте контроля было проведено и оцифровано 76 измерений. Объем каждой выборки составил 10^4 дискретных отсчета. Осциллограф работал в режиме увеличенного разрешения в 11 бит. Определение момента начала записи проводилось по нарастающему фронту первичного сигнала.

Разработанный алгоритм обработки первичного сигнала выглядит следующим образом:

аналого-цифровое преобразование зависимости $\varepsilon(t)$ на выходе датчика и запись в память компьютера в виде дискретного двумерного массива;

применение операции цифровой фильтрации к полученному массиву ЭДС для устранения высокочастотных шумов, наводимых в первичном преобразователе;

численное дифференцирование;

выделение и последующее удаление из массива областей, не несущих информации о процессе контактного взаимодействия;

приведение полученной зависимости к $V(t)$ путем поэлементного деления дискретной зависимости на коэффициент пропорциональности согласно зависимости (1).

Реализация алгоритма обработки первичного сигнала проводилась с использованием программной среды MATLAB.

Глубина внедрения индентора $h(t)$ и контактное усилие индентора с материалом $F(t)$ определялись по зависимостям (2) и (3) соответственно [3]:

$$h(t) = \int_{t_0}^t V(t) dt, \quad (2)$$

$$F(t) = -m \frac{dV(t)}{dt}, \quad (3)$$

где m — масса системы индентирования ударника.

Знак «-» в выражении (3) указывает на направление прикладываемого усилия.

Цифровая фильтрация исходного дискретного сигнала проводилась с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и заключалась в переходе в область амплитуд частот, удалении амплитуд выше заданной частоты среза и обратном переходе во временную область.

Применение фильтра на основе ДПФ обусловлено характером ЭДС. Сигнал динамического индентирования является аperiodическим, а его энергия сосредоточена в области низких частот, поэтому основным требованием к фильтру является эффективное затухание низких частот без искажения формы основного сигнала (рис. 1).

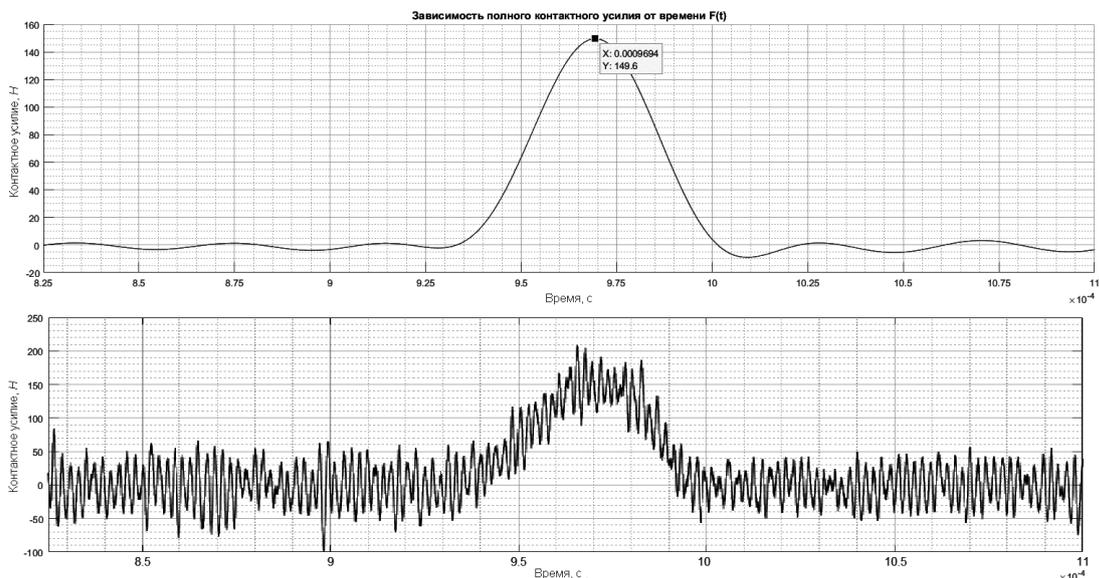


Рис. 1. Результат работы фильтра на основе ДПФ при частоте среза $f_{\text{срез}} = 25$ кГц.

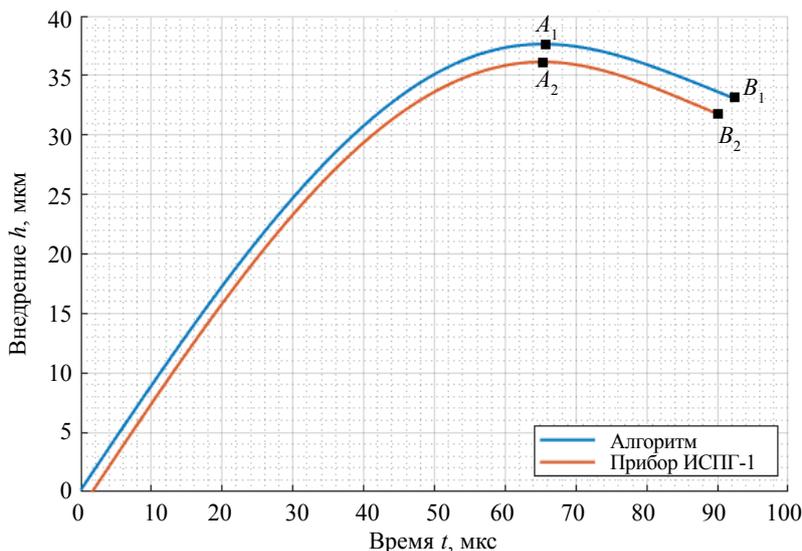


Рис. 2. Зависимость глубины внедрения индентора от времени на мере твердости 66НВ.

На рис. 2 проиллюстрирован результат работы разработанного алгоритма. Точками A_1 , B_1 и A_2 , B_2 обозначены максимальная и остаточная глубины внедрения системы индентирования ударника в материал. Разница в глубине внедрения, получаемой при помощи алгоритма и прибора ДИ, обусловлена аппаратными особенностями встроенного в прибор аналого-цифрового преобразователя и осциллографа.

Результаты измерений имеют разброс по нормальному закону распределения. Проводится сравнение результатов измерений, обработанных алгоритмом, и результатов, полученных с прибора ДИ, по величинам среднеквадратических отклонений (СКО) и математических ожиданий (МО) для выбранной характеристики. В качестве такой характеристики была выбрана остаточная глубина внедрения индентора (точки B_1 и B_2 на рис. 2). Таким образом, из 76 дискретных массивов зависимости внедрения во времени $h_p(t)$ было выбрано 76 точек, аналогичных B_1 на рис. 3. В случае прибора ДИ было проведено 40 измерений и получено соответственно 40 точек, аналогичных B_2 на рис. 2.

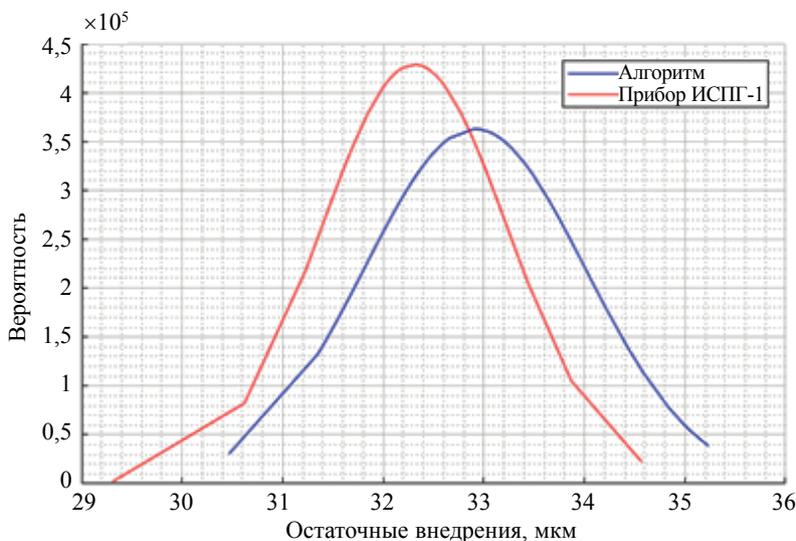


Рис. 3. Плотности распределения для выборки значений остаточных внедрений.

Для двух выборок остаточных значений внедрения были построены кривые плотности распределения (см. рис. 3).

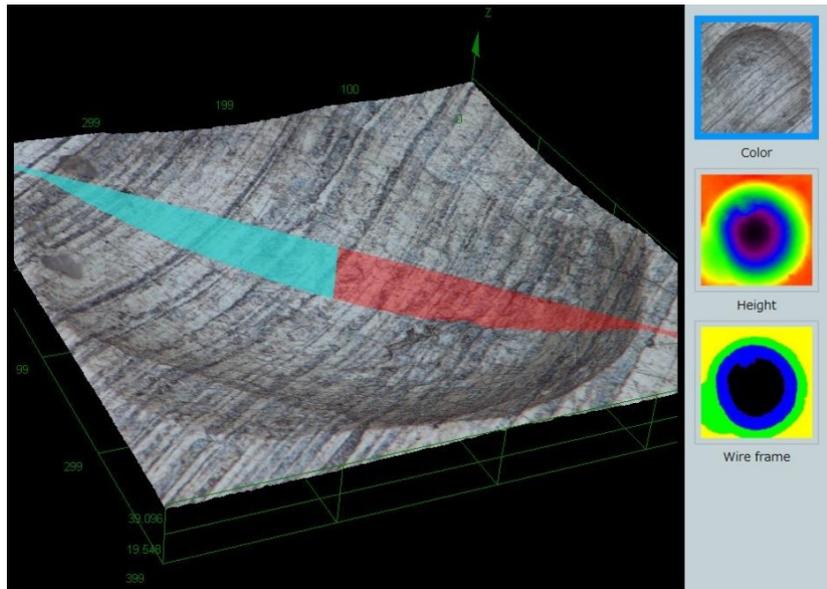


Рис. 4. Форма отпечатка для меры твердости 66НВ.

Далее с помощью оптического микроскопа трехмерного сканирования Olympus была получена форма отпечатка индентора на мере твердости 66НВ (рис. 4).

Численные значения МО и СКО для выборок остаточных глубин внедрения и геометрические параметры отпечатка на мере твердости 66НВ приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Численные значения МО и СКО

Статистические показатели		
	Прибор	Алгоритм
СКО, мкм	0,93	1,09
МО, мкм	32,31	32,91

Таблица 2

Геометрические параметры отпечатка на мере твердости 66НВ

Геометрические параметры отпечатка	
Ширина, мкм	246,21
Длина, мкм	248,50
Остаточная глубина внедрения h_{pr} , мкм	33,70

Используя допущение о неповторяемости геометрии отпечатка, а также о наличии погрешности измерения, значение остаточной глубины внедрения, полученное при помощи цифрового микроскопа, принимается за действительное. В таком случае, можно определить относительные погрешности средних значений остаточных глубин внедрений, полученных с помощью алгоритма и прибора ДИ.

Относительная погрешность среднего значения остаточной глубины внедрения h_{pi} с прибора из табл. 1 от значения, полученного при помощи микроскопа h_{pr} :

$$\delta_{h_{pi}} = \frac{h_{pr} - h_{pi}}{h_{pr}} \cdot 100\% = 4,10\%.$$

Относительная погрешность среднего значения остаточной глубины внедрения h_{pa} алгоритма из табл. 2 от значения, полученного при помощи микроскопа h_{pr} :

$$\delta_{h_{pa}} = \frac{h_{pr} - h_{pa}}{h_{pr}} \cdot 100 \% = 2,32 \%$$

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТВЕРДОСТИ

Также в рамках данного исследования был проведен анализ подходов к оценке динамической твердости материала.

Согласно ГОСТ Р 56474—2015 динамическая твердость материала определяется по следующей зависимости:

$$HD^{(S)} = \frac{F_{h_{\max}}^2}{2\pi Rm(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)}, \quad (4)$$

где $F_{h_{\max}}$ — значение контактной силы при максимальной глубине вдавливания, Н; R — радиус индентора, м; m — масса системы индентирования ударника, кг; V_{\max} — скорость индентора в момент времени, соответствующий началу контактного взаимодействия индентора с испытываемым материалом, м/с; V_{\min} — скорость индентора в момент времени, соответствующий завершению контактного взаимодействия с материалом, м/с.

Суть данного подхода заключается в определении отношения контактной силы, соответствующей максимальной глубине внедрения, к площади поверхности остаточного пластического отпечатка.

Вместе с тем анализ существующей литературы, а также экспериментальные исследования показали, что процесс контактного ударного взаимодействия характеризуется преобразованием кинетической энергии системы индентирования ударника в механическую работу упругопластической деформации испытываемого материала [6, 7]. Деформационный процесс при этом носит объемный характер, то есть динамическая твердость при ударе характеризует сопротивление внедрению не только на поверхности, но и в некотором объеме материала.

Исходя из вышесказанного, было предложено использовать подход, основанный на определении отношения суммарной работы к объему восстановленного отпечатка [8]:

$$HD^{(V)} = \frac{W_p}{V_p}$$

или

$$HD^{(V)} = \frac{m(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)}{\pi h_p^2 (R_p - \frac{1}{3} h_p)}, \quad (5)$$

где W_p — работа, затрачиваемая на упругопластическую деформацию материала; V_p — объем восстановленного отпечатка; h_p — остаточная глубина отпечатка после индентирования (глубина восстановленного отпечатка), м; R_p — радиус кривизны поверхности восстановленного отпечатка, м.

Стоит отметить, что при определении радиуса кривизны поверхности восстановленного отпечатка R_p необходимо учитывать контактную топографию поверхности материала при индентировании. Внедрение индентора сферической формы может сопровождаться как продавливанием материала ниже уровня исходной поверхности, так и выдавливанием вокруг него материала выше уровня исходной поверхности или образованием навала. Такие эффекты изменения поверхности материала при индентировании в иностранной литературе получили название «sink-in» («прогиб») и «pile-up» («навал») соответственно (рис. 5).

Такие эффекты характеризуются следующими неравенствами:

если $C^2 = \frac{h_c}{h_{\max}} < 1$, то наблюдается эффект «прогиб»;

если $C^2 = \frac{h_c}{h_{\max}} > 1$, то наблюдается эффект «навал».

Существуют различные подходы расчета характеристики C^2 , предложенные авторами [9—14]. Результаты анализа эффектов «прогиб» и «навал» показывают, что значение характеристики C^2 , в том числе зависит от значений показателя деформационного упрочнения материала n .

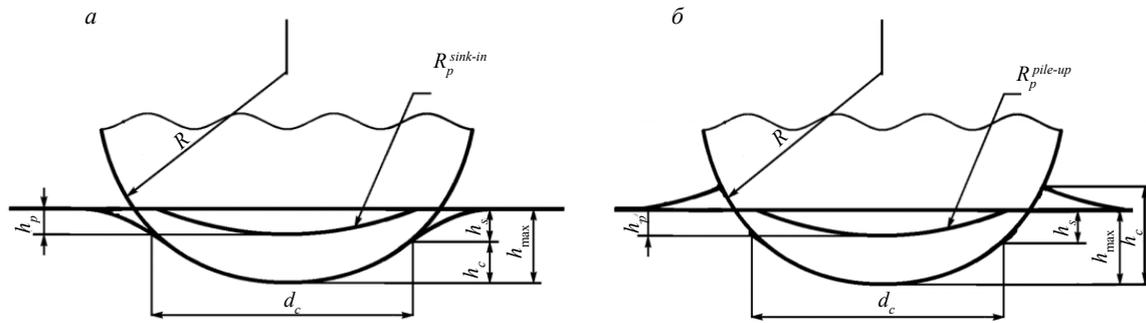


Рис. 5. Схема профиля поверхности материала при деформировании с эффектом «sink-in» / «прогиб» (а), с эффектом «pile-up» / «навал» (б):

h_{\max} — максимальная глубина внедрения индентора; h_p — остаточная глубина отпечатка после индентирования (глубина восстановленного отпечатка); h_c — контактная глубина внедрения индентора; h_{cp} — контактная глубина контура восстановленного отпечатка; R — радиус индентора; $R_p^{sink-in}$, $R_p^{pile-up}$ — радиусы кривизны поверхности восстановленного отпечатка.

В данной работе было предложено рассчитывать характеристику C^2 по выражению $C^2 = \frac{5}{2} \left(\frac{2-n}{n+4} \right)$ [10]. Справочные данные по значениям показателя деформационного упрочнения n для различных материалов и сплавов представлены в [15].

Анализируя выражение (5) и принимая допущение $h = h_{\max}$, можно рассчитать следующие величины:

величину упругого прогиба (восстановления) контура отпечатка h_s :

$$h_s = \frac{1}{2}(h_{\max} - h_p),$$

контактную глубину внедрения индентора h_c :

$$h_c = \frac{1}{2}(h_{\max} + h_p);$$

радиус кривизны поверхности восстановленного отпечатка $R_p^{sink-in}$:

$$R_p^{sink-in} = \frac{1}{2}R \left(\frac{h_{\max}}{h_p} + 1 \right). \quad (6)$$

Аналогично рассчитывается и радиус кривизны восстановленного отпечатка $R_p^{pile-up}$:

$$R_p^{pile-up} = R \frac{h_{pc}}{h_p},$$

$$h_s = \frac{1}{2}(h_{\max} - h_p),$$

$$R_p^{pile-up} = \frac{1}{2}R \left(\frac{h_{\max}}{h_p} (2C^2 - 1) + 1 \right). \quad (7)$$

С учетом выражений (5)—(7), объем восстановленного отпечатка и объемная динамическая твердость при эффектах «прогиб» и «навал» рассчитываются по следующим формулам:

$$V_p^{sink-in} = \frac{1}{2} \pi R h_p^2 \left(\frac{h_{\max}}{h_p} - \frac{2}{3} \frac{h_p}{R} + 1 \right), \quad (8)$$

$$HD_{IT}^{(V)sink-in} = \frac{m(V_0^2 - V_2^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{\max}}{h_p} - \frac{2}{3} \frac{h_p}{R} + 1 \right)}, \quad (9)$$

$$V_p^{pile-up} = \pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} (2C^2 - 1) - \frac{2}{3} \frac{h_p}{R} + 1 \right), \tag{10}$$

$$HD_{IT}^{(V)pile-up} = \frac{m(V_0^2 - V^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} (2C^2 - 1) - \frac{2}{3} \frac{h_p}{R} + 1 \right)}. \tag{11}$$

Полученные зависимости удобны при использовании, поскольку значения параметров h_p , h_{max} , V_{max} , V_{min} , необходимые для оценки объемной динамической твердости $HD^{(V)sink-in}$ и объемной динамической твердости $HD^{(V)pile-in}$, определяются по результатам динамического индентирования.

При проведении экспериментальной части использовался прибор ДИ со следующими характеристиками ударника: $R = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м, $m = 4,8 \cdot 10^{-3}$ кг. Исследования проводили на мерах твердости 6НВ и 172НВ.

При определении характеристики C^2 учитывались следующие факторы:

мера твердости 66НВ изготовлена из алюминиевого сплава, показатель деформационного упрочнения которого согласно ГОСТ 25.503—97 находится с пределах 0,19—0,26;

мера твердости 172НВ изготовлена из углеродистой или легированной стали, показатель деформационного упрочнения материала которых согласно ГОСТ 25.503—97 находится с пределах 0,18—0,25.

С учетом описанных факторов при индентировании мер твердости будет наблюдаться эффект «навал».

На каждой мере твердости было проведено индентирование в 10 точках. С использованием полученных массивов исходных данных ($V(t)$, $F(t)$, $h(t)$) был произведен расчет поверхностной и объемной динамических твердостей, рассмотренных в настоящем исследовании. При расчете объемной динамической твердости для всех исследуемых мер твердости было использовано следующее допущение: $n = 0,23$. Стандартная неопределенность была оценена по ГОСТ Р 54500.3—2011: среднее значение \bar{q} и выборочное стандартное отклонение $s(\bar{q})$. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Анализ полученных результатов показал, что выборочное стандартное отклонение значений объемной динамической твердости существенно ниже выборочного стандартного отклонения поверхностной динамической твердости. Предложенный показатель объемной динамической твердости дополняет показатели, представленные в ГОСТ 56474—2015 и в существующем приборе динамического индентирования.

Таблица 3

Результаты расчета динамической твердости

Образец 66НВ	$HD^{(S)}$, МПа	$HD^{(V)pile-up}$, МПа
1	464,46	668,81
2	637,47	632,62
3	538,60	624,66
4	512,53	663,31
5	528,97	669,18
6	541,82	676,82
7	506,83	671,40
8	492,55	606,17
9	530,84	693,87
10	584,35	628,78
\bar{q}	533,81	653,56
$s(\bar{q})$	48,43	28,26

Образец 172НВ	$HD^{(S)}$, МПа	$HD^{(V)pile-up}$, МПа
1	1218,32	1954,87
2	1448,98	1878,15
3	1609,08	1911,32
4	1306,85	1754,78
5	1306,85	1754,78
6	1145,31	1916,21
7	1335,07	1877,79
8	1482,89	1995,23
9	1377,53	1795,02
10	1382,40	1898,21
\bar{q}	1361,33	1873,64
$s(\bar{q})$	132,62	81,44

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм обработки первичного сигнала динамического индентирования, позволяющий осуществлять переход от значений ЭДС первичного преобразователя к характеристикам упруго-пластического внедрения индентора в испытуемый материал.

Полученные результаты показывают работоспособность разработанного алгоритма обработки первичного измерительного сигнала. Отклонение значения остаточного внедрения с алгоритма от значения внедрения, полученного при помощи микроскопа, не превышает 2,5 %. Для прибора ДИ относительное отклонение составило более 4 %.

Также предложен алгоритм перехода от характеристик упруго-пластического внедрения индентора в испытуемый материал к значениям динамической твердости за счет использования объемного подхода.

Таким образом, предложенные подходы, основанные на определении отношения суммарной работы к объему восстановленного отпечатка, могут послужить основой для разработки алгоритма оценки динамической твердости при процессе контактного ударного взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моценок В.И.* Современная классификация методов определения твердости // Автомобильный транспорт. Вып. 25. 2010. С. 129—132.
2. *Рудницкий В.А., Рабцевич А.В.* Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов // Дефектоскопия. 1997. № 4. С. 79—86.
3. *Крень А.П., Рудницкий В.А., Зинкевич Н.В.* Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при измерении твердости // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия Физико-технических наук. 2017. № 4. С. 38—45.
4. *Крень А.П., Мацулевич О.В., Делендик М.Н.* Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроля методом индентирования // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9. № 3. С. 263—271.
5. *Марусин М.П., Протасеня Т.А.* Разработка первичного преобразователя прибора динамического индентирования для измерения механических свойств материалов // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 10. С. 85—87.
6. *Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В., Федоров И.Б.* Применение кривых кинетического индентирования сферой для определения механических свойств материалов // Братский государственный университет. 2013. Вып. № 1 (17). С. 41—47.
7. *Мильман Ю.В., Чугунова С.И., Гончарова И.В.* Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2011. № 4. С. 182—187.

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

9. *Norbury A., Samuel T.* The Recovery and Sinking-in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the Effect of these Factors on the Correlation of the Brinell with Certain other Hardness Tests // *Journal of the Iron Steel Institute.* 1928. V. 117. P. 673—687.

10. *Matthews J.R.* Indentation Hardness and Hot Pressing // *Acta Materialia.* 1980. V. 28. P. 311—318.

11. *Hill R., Storakers B., Zdunek A. B.* A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test // *Proceedings of the Royal Society of London.* 1989. V. A. № 423. P. 301—330.

12. *Taljat B., Zacharias T., Kosel T.* New Analytical Procedure to Determine Stress-strain Curve from Spherical Indentation Data // *International Journal of Solids and Structures.* 1998. V. 35. P. 4411—4426.

13. *Alcala J., Barone A. C., Anglada M.* The Influence of Plastic Hardening on Surface Deformation Modes Around Vickers and Spherical Indents // *Acta Materialia.* 2000. V. 48. P. 3451—3464.

14. *Kucharski S., Mroz Z.* Indentation of Plastic Hardening Parameters of Metals from Spherical Indentation Tests // *Materials Science and Engineering A.* 2001. № 318. P. 65—76.

15. *Kim S.H., Lee B.W., Choi Y. and Kwon D.* Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials: A FEM study // *Mater. Sci. Eng. A.* 2006. V. 415. P. 59. + a Frontics Inc.