

## К исследованию поврежденности материала методом царапания

Н. Р. Музыка, В. П. Швец

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Предложен метод исследования поврежденности материала путем царапания его поверхности. Степень поврежденности материала оценивается по рассеянию результатов многократных измерений разностей значений глубины царапины. Для реализации метода разработано устройство, позволяющее исследовать поврежденность материала изделия с вертикальными, наклонными или потолочными поверхностями.*

**Ключевые слова:** поврежденность материала, глубина царапины, постоянство нагрузки на царапающий наконечник, рассеяние значений равнооточных изменений глубины царапины, коэффициент гомогенности.

**Введение.** Практически все машиностроительные материалы, в том числе стали и сплавы, имеют дефекты структуры, различные по своей природе и уровню. При эксплуатации несущих конструкций во время кратковременного или длительного нагружения имеющиеся зарождающиеся на начальной стадии эксплуатации дефекты начинают интенсивно развиваться, их плотность растет, вследствие чего изменяется структура материала и его физико-механические свойства. Это требует постоянного контроля технического состояния изделий, в частности оценки степени поврежденности металла.

В настоящее время разработано достаточно много методов неразрушающего контроля состояния реальных материалов [1]. Однако реализация большинства из них затруднена, кроме того, они недостаточно информативны. В этой связи особый интерес представляют методы оценки состояния материала по твердости, определение которой не составляет сложности и общедоступно.

Общепринятые методы определения твердости по измерениям параметров отпечатка от внедрения индентора в материал малопроизводительны и трудно поддаются автоматизации. Особенно это важно учитывать при реализации методов оценки поврежденности материала, в основу которых положена статистическая обработка массовых измерений твердости [2, 3]. Кроме того, количество измерений твердости известными методами на практике может быть ограничено размером исследуемой поверхности изделия. Такое ограничение следует из требований стандарта к соблюдению расстояния между центрами двух соседних отпечатков, что необходимо для получения достоверных экспериментальных данных [4].

Поэтому в последнее время все большее распространение находит давно разработанный способ определения твердости материала царапанием его поверхности (метод склерометрии) [5, 6]. Теоретические основы метода царапания приведены в работе [7]. Данный метод в Украине не стандартизирован, сведения о нем приведены в [8, 9].

Метод склерометрических исследований заключается в нанесении канавки небольшой длины на поверхность изделия алмазным царапающим наконечником, находящимся под действием постоянной нормальной нагрузки, и измерении ширины канавки или усилия, необходимого для получения царапины заданных параметров, по которым вычисляются значения твердости.

Особенность метода царапания состоит в определении твердости не при упругом или пластическом деформировании в результате вдавливания индентора в мате-

риал, а вследствие местного разрушения волокон материала перемещающимся царапающим наконечником.

Для реализации метода используют специальные твердомеры (склерометры) [7]. Испытания материалов методом царапания осуществляются двумя основными способами. При первом, наиболее распространенном способе определения твердости поверхности изделия, регистрируется диаграмма деформирования в координатах ширина (глубина) царапины – ее длина, при втором: сила царапания – длина царапины [10].

Заметим, что твердость, определяемая при царапании, может отличаться от твердости при вдавливании: один материал может оказаться тверже при испытании методом царапания, но мягче при испытании индентированием.

Метод царапания широко используется для испытаний покрытий с целью определения адгезионной и когезионной прочности, стойкости к царапанию и оценки износостойкости материалов [11, 12]. Кроме того, его применяют для определения механических свойств по параметрам твердости [13, 14], по изменению которых оценивают состояние металла в процессе эксплуатации изделия. Чем пластичнее материал, тем меньше точность устанавливаемых зависимостей между твердостью и прочностью. Только при испытании хрупких материалов получаемые значения твердости методом царапания можно более или менее надежно сравнивать с прочностью, поскольку оба свойства обусловлены в основном сцеплением между микрочастицами материала. Также установлено, что значения отдельных локальных измерений твердости, полученных даже при абсолютно точном измерении, не могут служить надежными экспериментальными параметрами для диагностики поврежденности материала. Это связано с отсутствием устойчивой корреляции между измеряемыми параметрами твердости и структурным состоянием материала [2].

Кроме того, для метода царапания характерны низкая производительность из-за необходимости измерения параметров царапины оптическими средствами и трудности контроля процесса измерения.

Целью настоящей работы является разработка экспериментального метода оценки поврежденности материала конструктивных элементов с использованием царапания, а также повышение его производительности и точности.

**Методика испытаний.** Известные достаточно достоверные методы определения твердости по параметрам царапины с незначительными усовершенствованиями были использованы для создания нового метода оценки поврежденности изделия в процессе наработки. Согласно этому методу в качестве параметра поврежденности материала принимается не твердость, а рассеяние результатов многократных равнозначных измерений разностей значений глубины царапины. Такой ряд измерений значений глубины царапины подчиняется закону нормального распределения и может быть обработан методами математической статистики. К достоинствам метода относится то, что при оценке поврежденности материала нет необходимости в определении истинных значений измеряемого параметра (глубина царапины). С помощью метода можно обнаружить наиболее слабые места конструктивных элементов по степени поврежденности материала, проанализировать его деградацию в этих местах, что позволит оценить работоспособность изделия.

В качестве параметра оценки поврежденности материала приняты коррелирующие со структурным состоянием параметр  $m$  в распределении Вейбулла, который имеет смысл коэффициента гомогенности материала [2], и коэффициент вариации  $\nu$ , указывающий на рассеяние случайной величины по сравнению со средним значением [3]. Чем больше неоднородность структуры материала конструктивного элемента, тем больше рассеяние измеряемых характеристик, т.е. большим значениям параметра  $m$  (или меньшим значениям коэффициента вариации  $\nu$ ) отвечает низкий уровень рассея-

ния измеряемой величины и соответственно лучшая упорядоченность структуры материала.

Возможность получения на царапине небольшой длины множества значений ее глубины позволяет не проводить необходимое для статистической обработки результатов испытания такое количество измерений твердости. Заметим, что достоверность оценки структурной неоднородности материала по рассеянию значений твердости вследствие накопления в процессе наработки повреждений не зависит от способа определения ее значений.

Непрерывная фиксация измерений значений глубины царапины при постоянном контакте с материалом перемещающегося царапающего наконечника существенно расширяет возможности диагностики состояния изделия и сокращает время ее проведения.

Для оценки поврежденности материалов по описанной методике использовали устройство, схема которого показана на рис. 1.

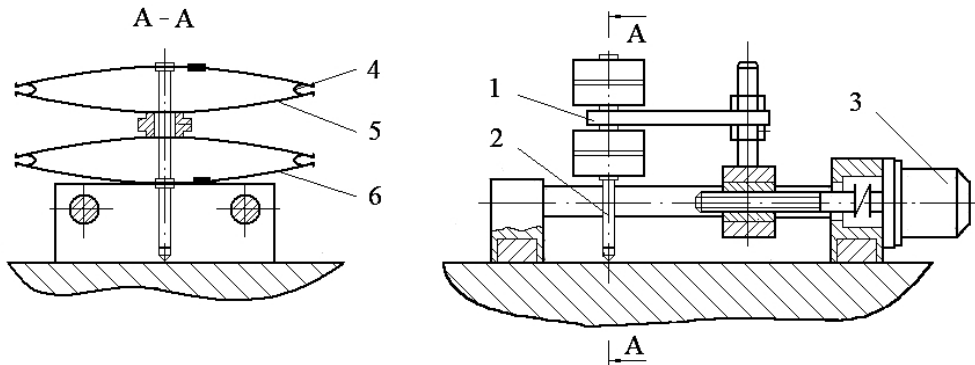


Рис. 1. Схема устройства для оценки поврежденности материала изделия по параметрам царапины: 1 — измерительная головка с узлом нагружения; 2 — царапающий наконечник; 3 — механизм поступательного перемещения царапающего наконечника; 4 — упругий шарнир; 5, 6 — упругие направляющие с тензометрическими датчиками.

Устройство закрепляется на поверхности изделия, подготовленной согласно требованиям стандарта [15] до шероховатости  $R_a = 1$  мкм. Измерительная головка является основным механизмом устройства. Она содержит узел нагружения, включающий алмазный конический царапающий наконечник с углом у вершины  $110^\circ$  и плоским срезом вершины диаметром 0,06 мм, ориентированным ортогонально к оси конуса.

Обычно в качестве постоянного фактора нагрузки на царапающий наконечник используется сила тяжести [7, 13], что затрудняет диагностику изделия с вертикальными, наклонными или потолочными поверхностями. Для проведения исследований при вышеотмеченных условиях царапающий наконечник устанавливается на упругих направляющих прямолинейного перемещения, для которых характерно отсутствие радиального зазора и постоянное внутреннее трение упругости. Упругие направляющие выполнены в виде двух пар плоских упругих элементов, обеспечивающих приложение нагрузки на царапающий наконечник. Каждая пара упругих направляющих соединена по краям упругими V-образными шарнирами и установлена таким образом, что разность между усилиями, развиваемыми каждой парой в исходном состоянии, является рабочим усилием, при котором царапающий наконечник внедряется в материал. Царапину наносят, перемещая наконечник по поверхности исследуемого изделия, при этом он вследствие неоднородности структуры материала совершает возвратно-поступательные перемещения в осевом направлении, углуб-

ляясь в материал на разную глубину. В этом случае при измерении глубины царапины уменьшение усилия, прилагаемого к царапающему наконечнику одной парой, компенсируется увеличением на ту же величину усилия, развиваемого другой парой. В результате нагрузка внедрения царапающего наконечника в материал остается постоянной независимо от величины осевого перемещения [16].

Глубина проникновения царапающего наконечника в материал непрерывно определяется с помощью тарировочных зависимостей по показаниям закрепленных на упругих элементах тензодатчиков, преобразующих механическое перемещение царапающего наконечника в электрический сигнал [17]. В процессе перемещения царапающего наконечника с заданной скоростью и постоянной нагрузкой происходит компьютерная обработка значений глубины царапины. Исходная глубина внедрения царапающего наконечника не превышает 1 мм и зависит от свойств материала.

Точность определения разности двух последовательно определяемых значений глубины царапины составляет 1 мкм. При этом исключается влияние упругости контактирующих материалов на регистрируемые показатели.

Непрерывная регистрация значений глубины проникновения царапающего наконечника в материал позволяет при незначительной длине царапины получить большое количество измерений ее глубины (на длине царапины 20 мм – 500 замеров), что особенно важно для проведения статистической обработки результатов изменения глубины царапины.

Высокая достоверность оценки поврежденности структуры материала достигается путем исключения влияния эффекта упругого восстановления параметров царапины и снижения влияния шероховатости исследуемой поверхности материала. Это обусловлено тем, что при оценке поврежденности материала в качестве исходных параметров для расчета коэффициентов  $m$  или  $\nu$  принимаются не отдельные абсолютные значения глубины царапины, а результаты многократных равнозначных измерений их разностей при перемещении первоначально внедренного в материал нагруженного постоянной силой царапающего наконечника. Кроме того, проведение измерений в процессе перемещения царапающего наконечника по поверхности изделия значительно повышает их точность вследствие снижения влияния трибологических эффектов на регистрируемые параметры, вызванных действием тангенциально направленных к общей границе между царапающим наконечником и материалом сил “сухого” трения, препятствующих его перемещению [18].

Формирование царапины происходит следующим образом. Первоначально под действием нагрузки царапающий наконечник внедряется в поверхность изделия на определенную глубину, зависящую от механических свойств испытываемого материала, при этом часть металла из лунки выносится на поверхность материала в виде кругового отвала. Далее при перемещении царапающего наконечника вдоль поверхности исследуемого изделия он боковой поверхностью деформирует материал, немного выходя из лунки, переходит через отвал, частично разрушая его, при этом на диаграмме царапания наблюдается скачок (рис. 2).

При дальнейшем перемещении царапающий наконечник внедряется в материал на рабочую глубину. Это положение наконечника при заданном уровне нагрузки принимается за точку отсчета глубины царапины. Из-за неоднородности структуры материала царапающий наконечник углубляется на разную глубину, совершая осевые возвратно-поступательные перемещения. Контроль усилия внедрения царапающего наконечника в материал осуществляется по сигналам тензодатчиков в соответствии с тарировочной зависимостью усилие–прогиб упругих пластин.

Данные о величине сопротивления перемещению царапающего наконечника в зависимости от прилагаемой нагрузки представлены в таблице.

Как видно, сопротивление перемещению царапающего наконечника примерно равно прилагаемой к нему осевой нагрузке.

**Сопротивление (Н) перемещению царапающего наконечника  
в зависимости от прилагаемой нагрузки**

Материал	Нагрузка на царапающий наконечник, Н					
	5	10	15	20	25	30
Сплав Д16	5,0	9,5	13,0	16,5	21,0	24,5
Сталь 12Х18Н10Т	4,5	9,0	13,0	16,5	21,0	25,5
Сталь 45	6,0	10,0	15,5	21,0	25,0	30,5
Сталь 09Г2С	6,0	11,0	16,0	21,5	25,5	31,5

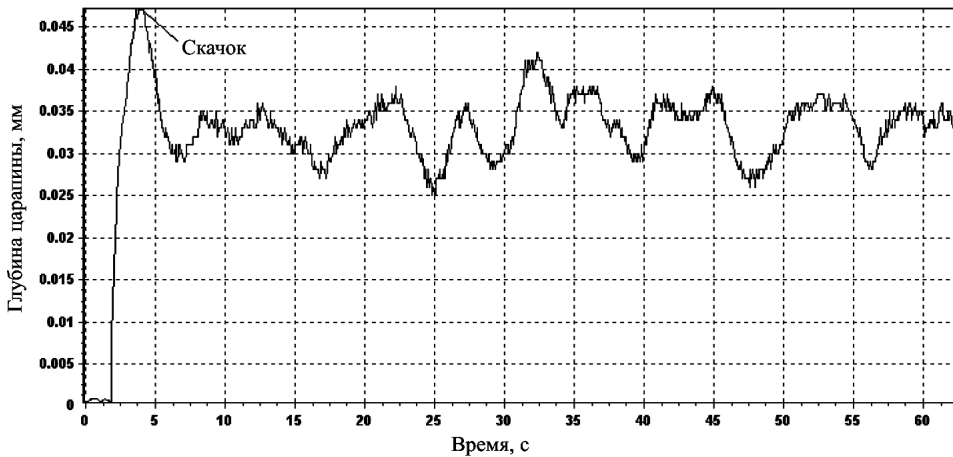


Рис. 2. Типичный вид диаграммы царапания для всех исследуемых материалов.

На практике в качестве основного параметра для расчета твердости материала при ее измерении методом склерометрии принимается ширина царапины. Для этого используются установленные на склерометрах различные микроскопы (оптические, интерферометрические или сканирующие зондовые). Однако в процессе формирования царапины, что сопровождается последующей деформацией и разрушением материала из-за движения боковой поверхности царапающего наконечника, по ее краям образуются отвалы, неопределенность положения границ которых существенно затрудняет проведение качественного измерения “истинной” ширины (рис. 3).

Оценивали поврежденность стали 45 и латуни Л63. Ширину царапины измеряли микроскопом OLYMPUS BX51M, глубину – с помощью разработанного устройства. Значения коэффициентов вариации  $\nu$  рассчитывали методом ЛМ-твердости [2]. Для стали 45 при расчете по данным ширины царапины получено  $\nu = 1,2078\%$ , по глубине –  $1,043\%$ , для латуни Л63 соответственно –  $\nu = 3,58$  и  $1,799\%$ . Исходя из значений коэффициентов вариации, рассчитанных по данным глубины царапины при статическом вдавливании царапающего наконечника (для стали 45  $\nu = 0,5\%$ , для латуни Л63  $\nu = 1,312\%$ ), можно заключить, что метод, исключая необходимость получения изображения отпечатка, позволяет более корректно оценить поврежденность материала по значениям рассеяния глубины царапины, на которые не влияет неоднозначность расположения берегов отвала.

Возможность практической реализации разработанного метода проиллюстрирована на примере оценки поврежденности структуры листовых материалов на образцах сталей марок 20, 45, 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава Д16Т.

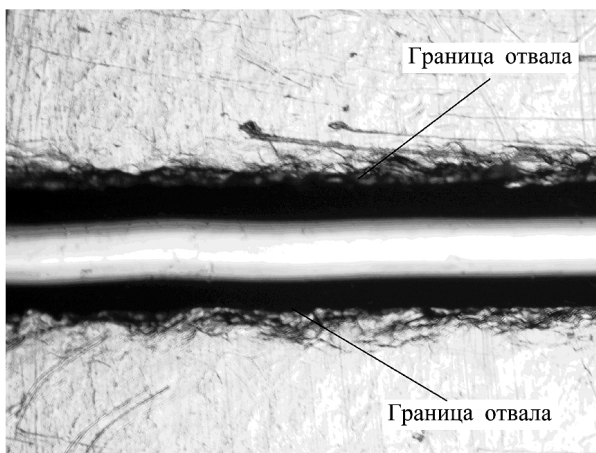


Рис. 3. Царапина, нанесенная на сталь 45.

На поверхности материала при нагрузке 25 Н на наконечник наносилась царапина длиной 15 мм с дискретностью 0,03 мм и выполнялось 300 измерений значений изменения ее глубины, при этом начальный участок длиной 5 мм из рассмотрения исключался.

Поверхность материала перед нанесением царапины полировали. Глубину царапины непрерывно регистрировали с помощью разработанной системы обработки данных в процессе ее нанесения. Это позволяет при небольшой длине царапины получить большое количество замеров глубины, что значительно повышает достоверность оценки неоднородности материала.

На рис. 4 приведены рассчитанные по рассеянию результатов многократных равноточных измерений разностей значений глубины царапины данные о коэффициенте вариации  $v$  для сталей 20, 45 12Х18Н10Т и сплава Д16Т. Эти данные, рассчитанные по результатам 25 измерений для каждого материала твердомером COMPUTEST фирмы ERNST (Швейцария), представлены в скобках и обозначены штриховой линией, относительно которой нанесены значения коэффициентов вариации, полученные методом царапания при разных скоростях и нагрузках.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что оптимальное значение скорости перемещения наконечника по поверхности материала  $V_{\max} = 4,4$  мм/мин, при этом нагрузка  $F$  составляет 20...25 Н. Это обеспечивает получение качественной царапины стабильных параметров, подтверждаемое наименьшим разбросом коэффициентов вариации  $v$ .

Для оценки неоднородности материала – алюминиевого сплава Д16 в исходном состоянии и после термической обработки на его поверхность с помощью наконечника, который находится под постоянной нагрузкой 5 Н, наносили царапину длиной 10 мм.

Результаты статистической обработки измеряемых значений глубины проникновения наконечника в исследуемый материал методом ЛМ-твердости показали существенное изменение коэффициентов гомогенности, характеризующих степень неоднородности материала после термической обработки, по сравнению с их значениями для исходного материала: при незначительном изменении абсолютных значений глубины для материала в исходном состоянии – 28...33 мкм и после термообработки – 15...19 мкм. Если абсолютные значения глубины царапины изменились соответственно на 1,2 и 1,3%, то коэффициенты гомогенности для этих значений изменились на 18 и 34%.



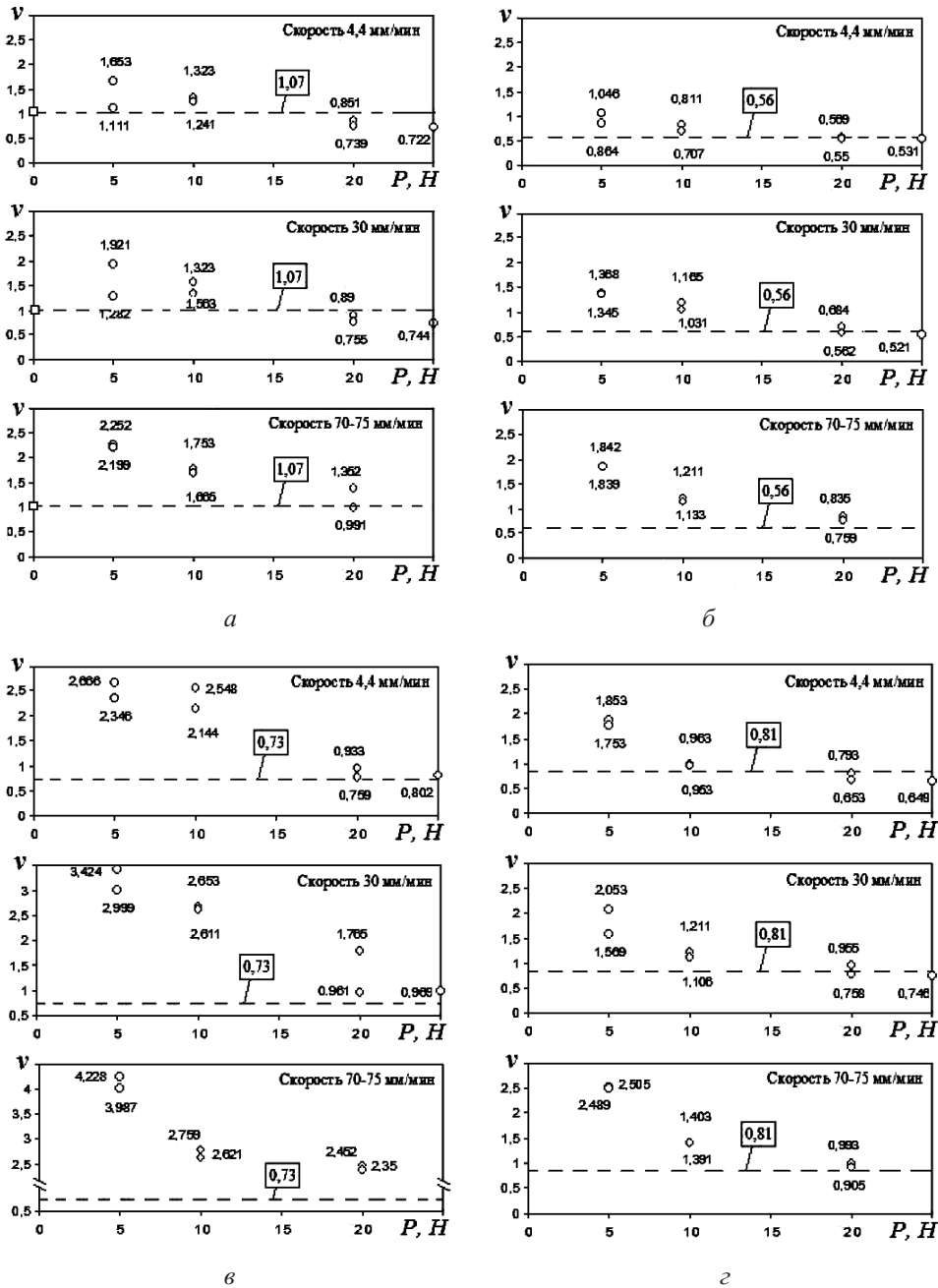


Рис. 4. Оценка поврежденности сталей 20 (а), 45 (б), 12X18H10Т (в) и сплава Д16Т (г) коэффициентом вариации  $v$  по рассеянию значений глубины царапины в зависимости от скорости перемещения и нагрузки на царапающий наконечник.

Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что более показательными параметрами относительно информативности и достоверности являются характеристики рассеяния абсолютных значений глубины царапины, полученных при одинаковых условиях измерений. Большие значения коэффициента гомогенности указывают на улучшение структуры материала после термообработки.

Метод позволяет оценивать структурную неоднородность материала и изучать кинетику накопления рассеянных повреждений путем нанесения царапины на диагностируемую поверхность изделия в исходном состоянии, а также после наработки. Обеспечение непрерывности измерения значений глубины царапины при перемещении наконечника по поверхности материала значительно повышает производительность проведения исследований.

## Выводы

1. Предложен экспресс-метод оценки степени поврежденности структуры материала конструктивных элементов, в том числе имеющих произвольно расположенные поверхности, по рассеянию результатов многократных равнооточных последовательных измерений разностей значений глубины царапины.

2. Возможность выполнения статистической обработки данных большого количества значений разности глубины царапины обеспечивает высокую эффективность предлагаемого метода.

3. Показано, что полученные на царапине небольшой длины данные о глубине внедрения царапающего наконечника позволяют заменить необходимое для проведения статистической обработки результатов испытаний большое количество экспериментальных измерений твердости.

4. Метод имеет значительные преимущества, поскольку при оценке степени поврежденности материала нет необходимости в получении изображения царапины и определении абсолютных значений ее параметров (глубина или ширина), на результаты которых существенно влияет состояние поверхности и силы упругости материала, искажающие эти параметры при удалении царапающего наконечника из зоны царапания.

5. Метод реализован в устройстве для диагностики поврежденности материала, которое обеспечивает постоянство заданного усилия вдавливания царапающего наконечника в материал независимо от режима царапания, величины его осевого перемещения и расположения диагностируемой поверхности изделия.

## Резюме

Запропоновано метод дослідження пошкодженості матеріалу шляхом дряпання його поверхні. Міру пошкодженості матеріалу оцінювали за розсіянням результатів багаторазових вимірювань різниці значень глибини подряпини. Для реалізації методу розроблено пристрій, що дозволяє досліджувати пошкодженість матеріалу виробу з вертикальними, похилими або стельовими поверхнями.

1. *ГОСТ 18353-79*. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Госстандарт СССР, 1979. – 40 с.
2. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5–12.
3. *Лебедев А. О., Музыка М. Р.* Технічна діагностика стану матеріалу методом ЛМ-твердості // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 97–101.
4. *ГОСТ 22761-77*. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 6 с.



5. Хрущев М. Н. Склерометрия. – М.: Наука, 1968. – 205 с.
6. Усеинов А., Усеинов С. Измерение механических свойств методом царапания // Наноиндустрия. – 2010. – № 6. – С. 28–32.
7. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
8. ASTM E2546-07. Standard Practice for Instrumented Indentation Testing. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
9. ГОСТ 21318-75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. – М: Изд-во стандартов, 1978. – 28 с.
10. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов: пособие для научных и инженерно-технических работников. – М: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
11. Лебедев Е. И., Соколов Г. Н., Зорькин И. В. и др. Исследование высокотемпературных свойств наплавленного металла методом склерометрии // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 1. – С. 40–44.
12. Гадалов В. Н., Болдырев Ю. В., Алехин Ю. Г. и др. К исследованию механических свойств защитных покрытий методом царапания // Конструирование, использование и надежность машин с/х назначения: Сб. науч. работ межвуз. науч.-практ. конф. – Брянск: Брянск ГСХА, 2004. – С. 245–250.
13. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
14. Дрозд М. С. Определение механических свойств металлов без разрушения. – М.: Металлургия, 1965. – 171 с.
15. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 11 с.
16. Пат. 45112 Україна. Спосіб оцінки неоднорідності матеріалу / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, В. П. Швець. – Чинний від 26.10.2009. Бюл. № 20.
17. Пат. 44786 Україна. Прилад для випробування матеріалу на твердість дряпанням / А. О. Лебедев, Г. А. Гогоці, М. Р. Музыка та ін. – Чинний від 12.10.2009. Бюл. № 19.
18. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Швець В. П. О резервах повышения достоверности методов определения твердости материалов // Пробл. прочности. – 2011. – № 3. – С. 5–18.

Поступила 12. 01. 2015