

УДК 620.178:539.431(045)

**С.Р. ИГНАТОВИЧ, Д.И. БОРИСОВ, С.С. ЮЦКЕВИЧ**

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## **ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НАНОСКЛЕРОМЕТРИИ С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ**

Предлагается методика диагностирования состояния поверхностного слоя материалов методом царапанья. При царапаньи регистрируется изменение силы сопротивления движению индентора вдоль трассы сканирования. На основании разработанной модели силового воздействия на индентор определяется функция структурно-деформационной неоднородности поверхностного слоя без учета влияния шероховатости поверхности. Данная функция является базовой для получения диагностической информации.

**поверхностный слой, наносклерометрия, структурно-деформационная неоднородность, поврежденность, шероховатость**

### **Введение**

При циклическом нагружении процессы деформирования и разрушения протекают в поверхностном слое более интенсивно, чем в остальном объеме материала [1, 2]. За счет неоднородного сопротивления структурных элементов пластическому деформированию на поверхности формируется неоднородное поле микропластических деформаций, что является значимым фактором усталостной поврежденности [3, 4]. Характеристики структурно-деформационной неоднородности микропрочностных свойств поверхностного слоя могут использоваться в качестве диагностических показателей технического состояния деталей [5], а к наиболее эффективным методам их регистрации относится метод склерометрии (индентирования царапанием) [6].

Современный этап развития методов локального и сканирующего индентирования характеризуется разработкой и использованием нового поколения приборов – наноиндентометров (нанотестеров), обладающих высокой разрешающей способностью регистрации глубины внедрения индентора (в нанометровом размерном диапазоне) при сверхмалых нагрузках. [7]. Высокая частота дискретизации данных по глубине внедрения индентора или при реги-

страции силы сопротивления царапанью позволяет получать более точную и обширную информацию о состоянии поверхности материала.

В связи с большими возможностями автоматизированных методов наносклерометрии, проблема их использования для диагностики поврежденности поверхностного слоя, в частности при усталости, становится весьма актуальной.

**Формулирование проблемы.** В процессе наноиндентирования шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на получаемые результаты, так как ее геометрические параметры соизмеримы с глубиной внедрения индентора [8]. При сканировании внедренного индентора сопротивление царапанью будет определяться не только структурно-деформационной неоднородностью, но и характеристиками рельефа поверхности. Влияние шероховатости в условиях сканирования внедренного на нанометровую глубину индентора не исследовалось.

Целью настоящей работы является построение и апробация модели силового воздействия на индентор при сканировании, позволяющей выделить из регистрируемой информации составляющую, характеризующую только неоднородность микропрочностных свойств по трассе царапанья.

## Решение проблемы

### Модель силового воздействия на индентор.

Напряженно-деформированное состояние при царапании довольно сложное и трудно поддается анализу [9]. Поэтому при рассмотрении силового взаимодействия между царапающим индентором и материалом принимаем следующие допущения.

1. Индентором является четырехгранная алмазная пирамида Виккерса с углом между гранями  $136^\circ$ .

2. Царапание осуществляется ребром пирамиды с постоянной скоростью перемещения индентора.

3. Так как основная работа при царапании расходуется на перемещение материала вдоль граней пирамиды, принимается, что силы, ответственные за пластическое деформирование материала в процессе формирования царапины, лежат в плоскости граней индентора.

4. В процессе царапания непрерывно регистрируются: лежащая в плоскости поверхности сила сопротивления перемещению индентора вдоль трассы сканирования – тангенциальная сила  $P_x$  и нормальное к поверхности перемещение индентора.

5. Сила трения между гранями пирамиды и материалом не учитывается.

6. Задается вертикальная сила  $P$ , с которой индентор внедряется в материал и которая в процессе царапания не изменяется.

На каждую переднюю грань пирамиды в плоскости, параллельной поверхности, действуют составляющие силы  $P_x$  – нормальная  $N_x$  и параллельная грани  $T_x$  (рис. 1, а). Очевидно, что

$$N_x = T_x = \frac{P_x}{2\sqrt{2}}. \quad (1)$$

В плоскости грани действуют взаимно перпендикулярные силы  $T_x$  и  $T_f$  (рис. 1, б). Силы  $T_x$  и  $T_f$  определяют результирующую силу  $T$ , которая действует в плоскости грани индентора и является ответственной за пластическое деформирование материала при его вытеснении в процессе царапания:

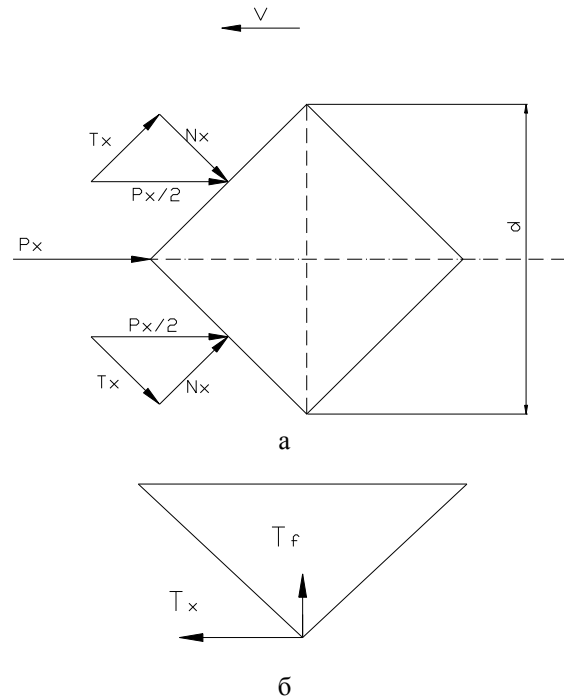


Рис. 1. Схема сил, действующих на индентор при царапании в плоскости, параллельной поверхности (а), и на его переднюю грань в плоскости, перпендикулярной поверхности (б)

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_f^2}. \quad (2)$$

Сила  $T_x$  задается выражением (1). Составляющую  $T_f$  можно определить по формуле:

$$T_f = P \cdot \cos \varphi \times \sin \left( \arctg \frac{2\sqrt{2}P}{P_x} \right) \times \left( \frac{P_x \operatorname{tg} \varphi}{2\sqrt{2}P} - 1 \right) \sqrt{\frac{1}{8} \left( \frac{P_x}{P} \right)^2 + 1}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – половина угла между гранями пирамиды Виккерса ( $\varphi = 68^\circ$ ).

Можно показать, что сила  $T$ , рассчитанная по формуле (2) с учетом соотношений (1) и (3), аппроксимируется линейной функцией:

$$T = 0,463P_x - 0,154P. \quad (4)$$

Процесс царапания состоит в преодолении индентором сопротивления пластическому деформированию материала при его вытеснении. Так как пластическое вытеснение материала контролируется силой  $T$ , то для любой координаты  $x$  индентора на трассе сканирования можно записать

$$T(x) = H(x)S(x), \quad (5)$$

где  $H(x)$  – твердость материала при царапании;  $S(x)$  – площадь контакта поверхности граней с материалом.

При царапании ребром вперед контакт индентора с материалом осуществляется двумя передними гранями (рис. 1). Поэтому для внедренной на глубину  $h(x)$  пирамиды Виккерса имеем

$$S(x) = \frac{2 \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} h^2(x). \quad (6)$$

Из соотношений (4) – (6) следует

$$P_x(x) \approx 0,33P + \frac{4,32 \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} H(x)h^2(x). \quad (7)$$

Изменение контактной глубины внедрения индентора вдоль трассы царапания запишем в виде

$$h(x) = h_0[1 + f(x)], \quad (8)$$

где  $h_0$  – среднее значение глубины внедрения индентора при локальном индентировании с силой  $P$  перед сканированием;  $f(x)$  – безразмерная случайная функция, описывающая отклонение профиля поверхности от его средней линии вдоль трассы сканирования.

Данная функция может быть определена по профилограмме поверхности вдоль трассы царапания и нормируется, исходя из следующих условий:  $f(0) = 0$ ;  $f_{\max} = R_{\max}/h_0$ ;  $f_{\min} = -R_{\min}/h_0$ , где  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  – соответственно максимальная высота выступа и минимальная глубина впадины по отношению к средней линии профиля по трассе сканирования. Для царапания необходимо, чтобы  $f(x) > -1$ .

Изменение микротвердости вдоль трассы сканирования можно описать функцией

$$H(x) = H_0[1 + g(x)], \quad (9)$$

где  $g(x)$  – безразмерная случайная функции, причем  $g(0) = 0$ ;  $H_0$  – среднее значение твердости материала, равное отношению вдавливающей силы  $P$  к площади проекции контактной поверхности индентора при царапании [10]:

$$H_0 = \frac{4P}{d^2} = \frac{P}{2h_0^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}, \quad (10)$$

где  $d$  – ширина царапины (рис. 1).

Подставив выражения (8) – (10) в формулу (7), определим функцию, описывающую изменение твердости материала в процессе царапания

$$g(x) = \frac{0,43}{[1 + f(x)]^2} \left[ \frac{P_x(x)}{P} - 0,33 \right] - 1. \quad (11)$$

Преобразование (11) трансформирует регистрируемую при царапании тангенциальную силу  $P_x(x)$  в характеризующую структурно-деформационную неоднородность поверхностного слоя функцию  $g(x)$ , исключая при этом влияние рельефа поверхности.

**Методика проведения эксперимента.** Испытывались плоские с плакированным слоем образцы из сплава Д16 с центральным отверстием – концентратором напряжений. Образцы подвергались отнулевому циклическому растяжению на испытательной машине МУП-50 с максимальным напряжением цикла 100 МПа. Периодически после  $2 \cdot 10^4$  циклов производились склерометрические исследования поверхности образцов с использованием прибора «Микрон-гамма» [11]. Царапанье осуществлялось алмазной пирамидой Виккерса ребром вперед с регистрацией тангенциальной силы сопротивления движению индентора  $P_x(x)$  (рис. 2, б).

Контроль поверхности царапаньем производился в непосредственной близости от отверстия – в зоне воздействия максимальных напряжений от концентратора, а также на некотором удалении от него, где напряжения были равны номинальным.

Осуществлялось два режима царапания – с силой внедрения  $P = 0,1$  и  $0,2$  Н. Перед царапаньем производилось сканирование трассы ненагруженным индентором и по профилограмме (рис. 2, а) определялась функция  $f(x)$ . На основании полученных зависимостей  $f(x)$  и  $P_x(x)$  (рис. 2, б) в автоматизированном режиме по формуле (11) рассчитывалась функция  $g(x)$  (рис. 2, а).

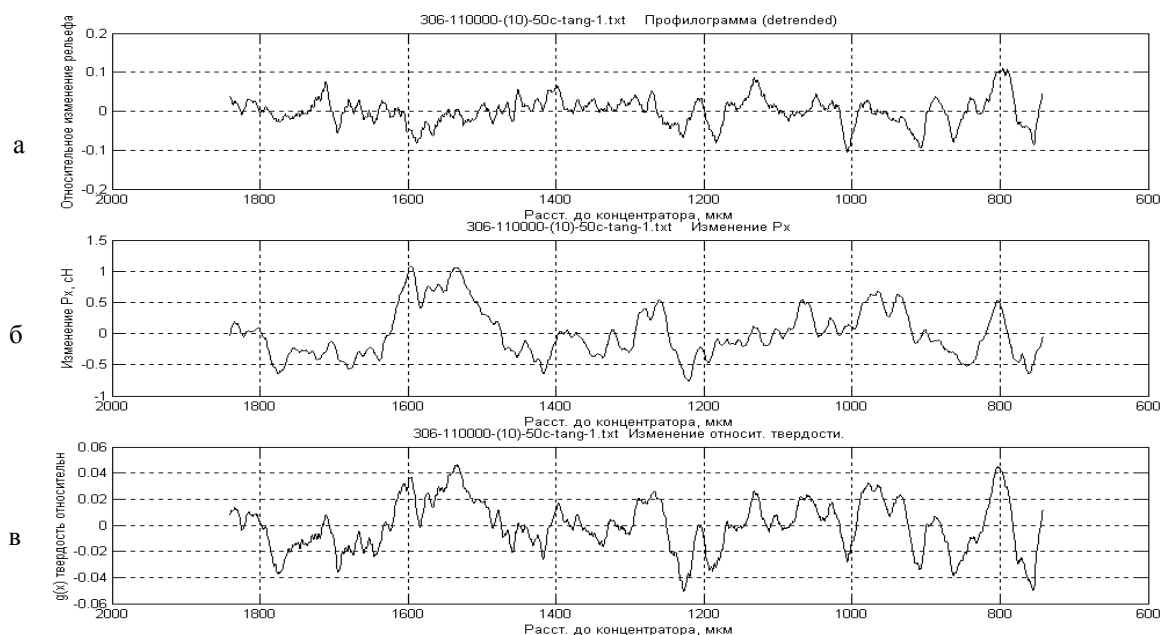


Рис. 2. Профиль поверхности сплава Д16АТ (а), зависимости тангенциальной силы  $P_x(x)$  (б) и функции  $g(x)$  (в) вдоль трассы сканирования индентора; сила внедрения индентора  $P = 0,1$  Н

**Результаты эксперимента.** Рассчитанная функция  $g(x)$  описывает структурно-деформационную неоднородность поверхностного слоя материала на глубине внедрения индентора без учета влияния рельефа поверхности. Полученная информация может обрабатываться соответствующими методами для определения статистических характеристик структурно-деформационной неоднородности, а также для верификации диагностических признаков состояния поверхностного слоя. Например, в качестве такого признака может выступать спектральная плотность (СП) случайной функции [5]. Однако, в отличие от подхода [5], это должна быть СП функции  $g(x)$ , а не процесса  $P_x(x)$ , в который включена случайная составляющая рельефа поверхности.

Рассмотрим случай, когда в качестве диагностического признака выступает среднеквадратичное отклонение (СКО) регистрируемых параметров.

Число циклов нагружения образца до образования трещины в зоне концентратора соответствовало  $1,3 \cdot 10^5$ . В процессе нагружения СКО функции  $g(x)$  в неповреждающейся зоне образца на удалении от концентратора не изменялось, несмотря на флуктуации СКО функций  $f(x)$  и  $P_x(x)$  (рис. 3, а).

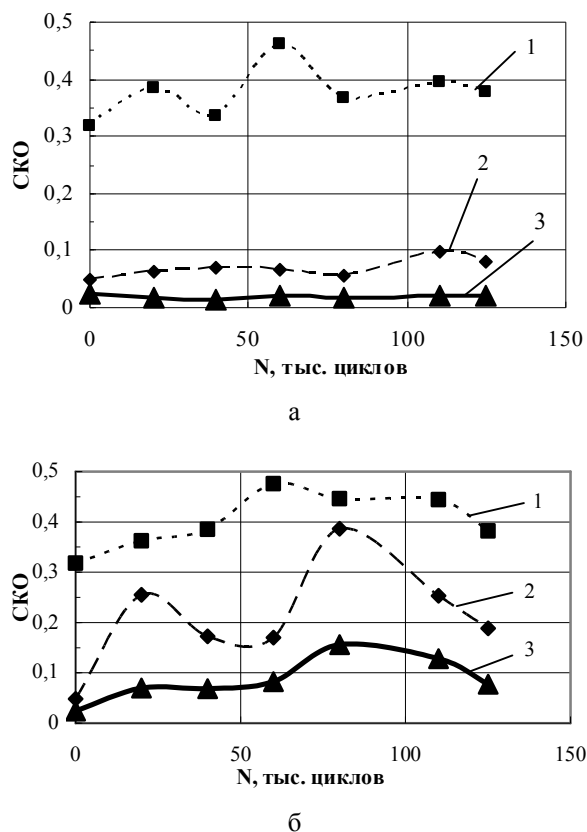


Рис. 3. Изменение СКО функции  $f(x)$  (1), тангенциальной силы  $P_x(x)$  (2) и функции  $g(x)$  (3) от числа циклов нагружения в различно нагруженных зонах образца: удаленной (а) и примыкающей к концентратору (б); сила внедрения индентора при царапании  $P = 0,1$  Н

В зоне максимальной поврежденности изменение СКО функции  $P_x(x)$  от наработки имеет сложный характер, а для функции  $g(x)$  наблюдается постоянство СКО до  $6 \cdot 10^4$  циклов, затем оно незначительно возрастает и уменьшается перед образованием трещины (рис. 3, б).

### Заключение

Представленные модель силового воздействия на индентор при сканировании и методика диагностирования поверхности царапаньем позволяют выделить из регистрируемой информации составляющую, характеризующую только неоднородность микропрочностных свойств по трассе царапанья. Методика позволяет выявлять структурно-деформационную неоднородность поверхностного слоя материалов, обусловленную усталостной поврежденностью.

Перспективным направлением в разработке новых методов диагностики состояния поверхности деталей по критериям структурно-деформационной неоднородности является использование современных эффективных методов обработки информации [12].

### Литература

1. Горицкий В.М., Терентьев В.Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
2. Прокопенко А.В., Маковецкая И.А., Штукатурова А.С. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщ. 2. Неравномерность свойств на поверхности // Пробл. прочности. – 1986. – № 6. – С. 41-44.
3. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
4. Романов А.Н., Гаденин М.М. Особенности рассредоточенного трещинообразования в связи с неоднородностью развития деформаций при малоцикловом нагружении // Структурные факторы малоциклового разрушения металлов. – 1987. – № 3. – С. 76-81.
5. Запорожец В.В., Кордонский Х.Б., Оре О.В. Деформационно-спектральный метод исследования однородности поверхностного слоя металлов // Надежн. и долг. машин и сооружений. – 1990. – № 17. – С. 57-65.
6. Игнатович С.Р., Борисов Д.И., Закиев И.М., Юцкевич С.С. Исследование микропластического деформирования при усталости методом склерометрии // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 8 (24) – С. 81-84.
7. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В. Определение комплекса механических свойств материалов в нанобъемах методами наноиндентирования // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2001. – Т. 3, № 2. – С. 122-135.
8. Zhang T.Y, Xu W.H., Zhao M.H. The role of plastic deformation of rough surfaces in the size-dependent hardness // Acta Mater. – 2004. – 52. – P. 57-68.
9. Маслов Е.Н. Теоретические основы процесса царапания металлов // Склерометрия. – М.: Наука, 1968. – С. 24-44.
10. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
11. Игнатович С.Р., Закиев И.М. Борисов Д.И. Методика исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов при усталости с использованием многофункционального прибора «Микрон-Гамма» // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 8 (16). – С. 163-166.
12. Бурау Н.И., Марчук П.И., Тяпченко А.Н. Анализ современных методов обработки акустических сигналов для их использования в задачах виброакустической диагностики // Акустичний вісник. – 2001. – 4, № 4. – С. 3-10.

Поступила в редакцию 10.06.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.О. Дмитриев, Национальный авиационный университет, Киев.