

УДК 620.173.21

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЕГО ИСПЫТАНИИ МЕТОДОМ «СКРЕТЧ-ТЕСТ»

К. С. СЕЛИВАНОВ

K.Selivanov@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 22 ноября 2014 г.*

**Аннотация.** Приведено исследование эквивалентных напряжений, возникающих при индентировании, и возможность их применения для оценки механических свойств поверхности с использованием одного из широко используемых на практике методов исследования поверхности «скретч-тест». Приведен пример практической реализации предложенного способа. Показана возможность определения механических свойств материала поверхности методом «скретч-тест» после различной упрочняющей обработки и нанесения функциональных покрытий.

**Ключевые слова:** индентирование; скретч-тест; поверхность; прочность; механические свойства.

Для экспериментального исследования физических и механических свойств материалов поверхности деталей машин в последнее время широко применяют так называемые прямые методы измерений «in situ» (непосредственное изучение свойств «на месте»). Уход, таким образом, от большой степени усреднения исследуемых свойств по объему образца позволяет по-новому взглянуть на ряд существующих проблем инженерии поверхности, физики прочности и пластичности.

Одной из основных задач в области инженерии поверхности является разработка методов локальных механических испытаний, позволяющих исследовать прочностные свойства материала, которые невозможно определить стандартными методами (например, испытаниями на статическую прочность при одноосном растяжении или сжатии). Наиболее распространенным и универсальным из подобных методов изучения поверхности является индентирование, широко применяемое для определения свойств поверхности по глубине от десятков нанометров до нескольких миллиметров [1]. В результате длительного развития этот простейший прием измерения превратился в тонкий многофункциональный исследовательский инструмент, пригодный для решения разнообразных инженерных задач, в том числе определения механических свойств поверхности: твердости, ползучести, предела текучести, модуля уп-

ругости, энергии упругой и пластической деформации и др. [1–8].

Непрерывное развитие измерительной техники позволяет расширить область использования известных исследовательских приемов для изучения новых свойств поверхности, в том числе после ее упрочнения и нанесения функциональных покрытий. Настоящая работа направлена на развитие методических возможностей известного метода динамического индентирования материала поверхности, известного как «скретч-тест» (Scratch Test).

При проведении испытаний методом скретч-теста решается основная задача определения критической нагрузки, при которой происходит аномальное изменение глубины вдавливания индентора [3, 9]. По величине этой нагрузки судят о характере разрушения упрочненной поверхности, износостойкости, качеству адгезии (при наличии покрытия) и др. При этом очевидно, что использование исследователями различных инденторов позволяет получать лишь относительные результаты, применимые для одинаковых условий испытания.

В большинстве случаев для проведения скретч-теста используют полусферические алмазные инденторы типа Роквелла с известным радиусом. Используя решение известной задачи Герца о внедрении жесткой полусферы в упругое полупространство [10–12] с учетом тангенциальных сил смещения [10, 11], возможно перейти от абсолютных показателей нагрузки

и размера индентора к напряжениям, действующим в области контакта, и, далее, к определению механических свойств материала поверхности и покрытий.

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.  
ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ  
ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ  
ПОВЕРХНОСТИ**

При вдавливании сферического индентора в упругое полупространство в зоне контакта возникает разнородное напряженно-деформированное состояние (НДС). На рис. 1, а представлены эпюры напряжений, подробно описанные в работах [2, 10, 11], показывающие, что в центре круговой площадки действует НДС, близкое к всестороннему сжатию; по контуру поверхности контакта, в плоскости ХУ, действует двухосное напряженное состояние, называемое чистым сдвигом; в остальной области – трехстороннее неравномерное сжатие.

Для случая круговой площадки максимальное нормальное давление  $p_0$ , действующее в центре контакта, равно:

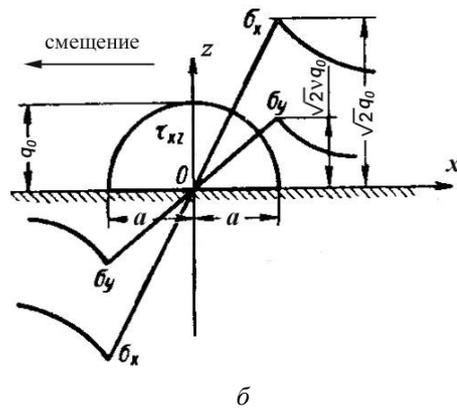
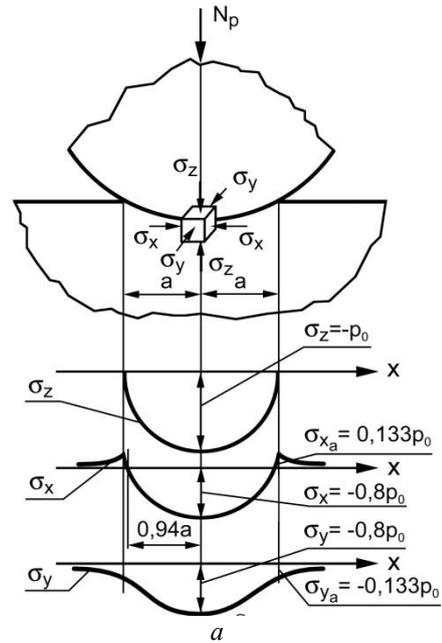
$$\sigma_z \equiv p_0 = \frac{3}{2} p = \frac{3}{2} \frac{P_N}{\pi a^2}, \tag{1}$$

где  $p$  – среднее давление в контакте;  $P_N$  – нормальная сила, действующая на сферу;  $a$  – радиус невосстановленного пятна контакта (лунки) индентора рассчитывают из чисто геометрических соображений [2]:

$$a = \sqrt{h_c(2R - h_c)}, \tag{2}$$

где  $R$  – радиус сферы,  $h_c$  – глубина проникновения индентора в материал поверхности (при упругом контакте примерно равна половине глубины индентирования).

При приложении к сфере касательного усилия, например в случае индентирования сферическим наконечником типа Роквелла, на площадке контакта дополнительно возникают напряжения сжатия перед сферой и растяжения позади нее [10, 11]. Максимальные значения возникающих напряжений действуют на границе контакта (рис. 1, б). Рассчитывая соответствующие величины напряжений из условия пропорциональности касательных сил нормальным:  $q_0 = \mu \cdot p_0$ , где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения, нетрудно исследовать эффект их совместного действия с компонентами напряжений при нормальном вдавливании:



**Рис. 1.** НДС в зоне контакта полусферы с упругим полупространством: а – распределение радиальных (x) и окружных (y) напряжений при индентировании без смещения; б – при трении с коэффициентом  $\mu$

1) на границе контакта перед индентором:

$$\begin{cases} \sigma_{1,2} \equiv \sigma_x = p_0 \frac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2}q_0 = p_0 \left( \frac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2}\mu \right); \\ \sigma_3 \equiv \sigma_y = -p_0 \frac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2}\nu q_0 = -p_0 \left( \frac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2}\nu\mu \right); \\ \sigma_{2,1} \equiv \sigma_z = 0; \end{cases} \tag{3}$$

2) на границе контакта позади индентора:

$$\begin{cases} \sigma_1 \equiv \sigma_x = p_0 \frac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2}q_0 = p_0 \left( \frac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2}\mu \right); \\ \sigma_{3,2} \equiv \sigma_y = -p_0 \frac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2}\nu q_0 = -p_0 \left( \frac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2}\nu\mu \right); \\ \sigma_{2,3} \equiv \sigma_z = 0. \end{cases} \tag{4}$$

3) на границе контакта по обоим краям ца-  
рапины:

$$\begin{cases} \sigma_1 \equiv \sigma_x = p_0 \frac{1-2\nu}{3}; \\ \sigma_3 \equiv \sigma_y = -p_0 \frac{1-2\nu}{3}; \\ \sigma_2 \equiv \sigma_z = 0. \end{cases} \quad (5)$$

4) в центре контакта:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_y = -p_0 \frac{1+2\nu}{2}; \\ \sigma_z = -p_0; \\ \tau_{xz} = -\mu \cdot p_0; \\ \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0; \end{cases} \quad (6)$$

5) в области максимальных касательных на-  
пряжений главные напряжения на некоторой  
глубине  $z$  при условии  $\mu < 0,3$  находят по фор-  
мулам [11]:

$$\begin{cases} \sigma_{1,2} \equiv \sigma_x = \sigma_y = -p_0 \left[ (1+\nu) \frac{1}{2} \frac{1}{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2} - (1+\nu) \frac{z}{a} \arctan \frac{a}{z} \right]; \\ \sigma_3 \equiv \sigma_z = -p_0 \frac{1}{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2}. \end{cases} \quad (7)$$

Заметим, что величины главных напряже-  
ний на границе контакта (3) и (4) при увеличе-  
нии коэффициента трения могут перейти через  
ноль и изменить направление своего действия.  
В этой связи эквивалентные напряжения для  
каждой области контакта будем рассчитывать  
по Мизесу (четвертая теория прочности), учи-  
тывая действие всех главных компонент

$$\sigma_{\text{экр}}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (8)$$

или напряжений, действующих по осям:

$$\sigma_{\text{экр}}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{yx}^2)}. \quad (9)$$

Проведенные расчеты показали, что эквива-  
лентные напряжения, вычисленные по четвер-  
той и третьей теории прочности ( $\sigma_{\text{экр}}^{III} = 2\tau_{\text{max}} =$   
 $= \sigma_1 - \sigma_3$ ), при изменении  $\mu$  от 0 до 0,5 расхо-  
дятся не более чем на 13%.

Таким образом, для исследования свойств  
поверхности методами динамического инденти-  
рования с использованием сферических инден-  
торов при действии максимального нормально-  
го давления  $p_0$  в области контакта будем рас-  
сматривать следующие эквивалентные напря-  
жения (рис. 2).

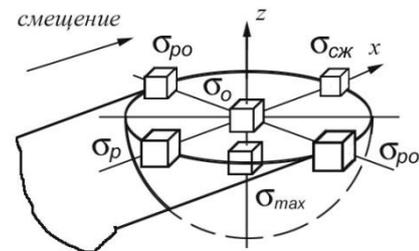


Рис. 2. Схема действия эквивалентных на-  
пряжений в зоне контакта полусферы  
с упругим полупространством при трении

Подставим (3) в (8) и после преобразования,  
пренебрегая малыми величинами четвертого  
порядка<sup>1</sup>, получим:

1) на границе площадки контакта позади  
индентора:

$$\sigma_p = p_0 \sqrt{3\beta^2 + 2\mu(1-\nu)(2\mu + 3\sqrt{2}\beta)}, \quad (10)$$

где  $\beta = (1-2\nu)/3$ .

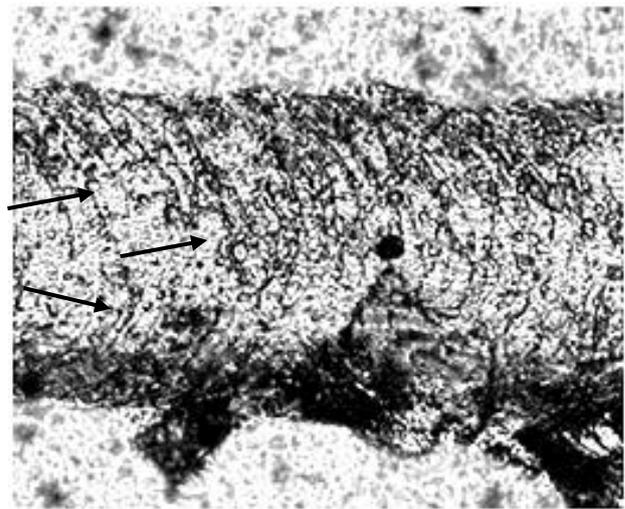


Рис. 3. Пример кольцевых микротрещин  
в покрытии при проведении скретч-теста  
(стрелками указаны кольцевые  
микротрещины по краям царапины)

В этой области действуют максимальные  
растягивающие напряжения, которые могут

<sup>1</sup> Расчеты показывают, что погрешность при  
этом составит не более 10%, что сопоставимо с то-  
чностью расчетов эквивалентных напряжений по  
третьей и четвертой теориям прочности.

быть причиной образования кольцевых трещин, наблюдаемые при индентировании хрупких тел [2, 10], рис. 3.

2) на границе контакта перед индентором:

$$\sigma_{сж} = p_0 \sqrt{3\beta^2 + 2\mu(1-\nu)(2\mu - 3\sqrt{2}\beta)}, \quad (11)$$

где  $\beta = (1-2\nu)/3$ .

3) на границе контакта по обоим краям царапины:

$$\sigma_{p0} = p_0 \sqrt{\frac{(1-2\nu)^2}{3}}. \quad (12)$$

При наличии покрытия на поверхности это напряжение обуславливает его отслоение при превышении им величины адгезионной прочности на срез. Пример отслоения покрытия показан на рис. 4. Очевидно, что разрушение происходит вдоль направления действия главных касательных напряжений, а именно под углом  $45^\circ$  к направлению движения индентора. Отметим, что эквивалентные напряжения в этой области не зависят от коэффициента трения ввиду отсутствия действия нормальных напряжений ( $\sigma_z = 0$ ).

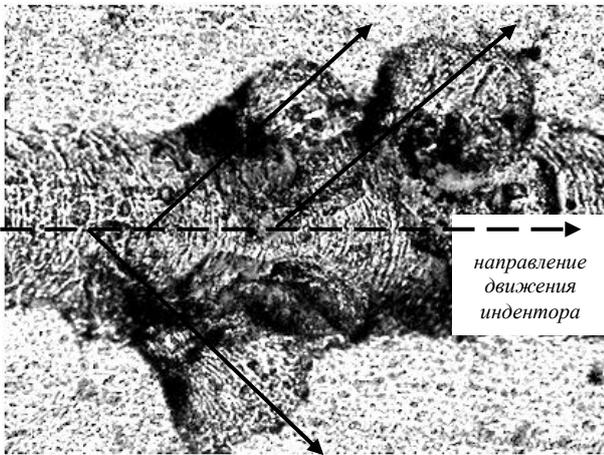


Рис. 4. Пример отслоения покрытия при проведении скретч-теста (стрелками показаны направления адгезионного разрушения покрытия)

4) в центральной области площадки контакта, подставляя (6) в (8):

$$\sigma_0 = p_0 \sqrt{\left(\frac{1-2\nu}{2}\right)^2 + 3\mu^2} \quad (13)$$

5) в области максимальных касательных напряжений (на некоторой глубине поверхности при условии  $\mu < 0,25$ ) [11]:

$$\sigma_{\max} = 2\tau_1 = p_0 \left[ \frac{3}{2} \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} + (1 + \nu) \left( \frac{z}{a} \arctan \frac{z}{a} - 1 \right) \right], \quad (14)$$

откуда рассчитывают максимальные касательные напряжения, действующие на глубине  $z = 0,48a$ :

$$(2\tau_1)_{\max} = p_0(1,22 - 0,46(1 + \nu)). \quad (15)$$

Что касается влияния коэффициента трения на величину максимального касательного напряжения  $\tau_1$ , то в диапазоне  $\mu$  от 0 до 0,3 его изменения незначительны, приблизительно от  $0,30p_0$  до  $0,32p_0$  [10]. При увеличении коэффициента трения  $\mu > 0,3$  по критерию Мизеса (или  $\mu > 0,25$  по критерию текучести Треска) начинается расширение области действия максимальных касательных напряжений и ее монотонное смещение к поверхности, а при достижении  $\mu \geq 0,44$  начало пластического течения возникает уже на самой поверхности [10]. В этом случае  $\sigma_{\max} \equiv \sigma_0 \approx 2\mu p_0$  (рис. 5).

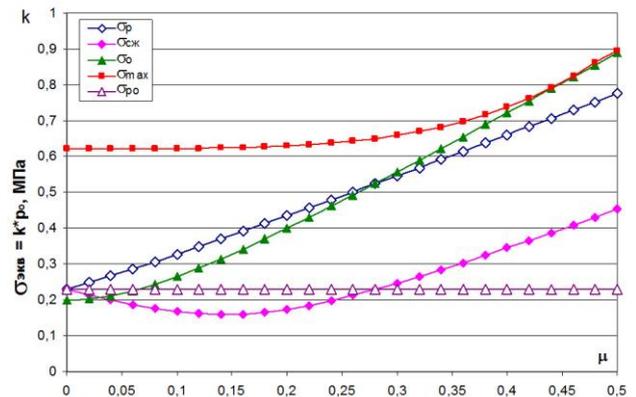


Рис. 5. Эквивалентные напряжения в зоне трения скольжения сферического индентора по упругому материалу с коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$ :  $\sigma_p, p_0$  – растягивающие напряжения позади индентора и по краям царапины соответственно;  $\sigma_{сж,0,\max}$  – сжимающие напряжения на передней границе контакта, в центральной области и под поверхностью соответственно;  $\mu$  – коэффициент трения

Результаты расчетов эквивалентных напряжений при различных значениях коэффициента трения приведены на рис. 5. Для сравнения полученных результатов с работами [2, 10–12] коэффициент Пуассона принимали постоянным, соответствующим стальной поверхности,  $\nu = 0,3$ .

Анализ полученных зависимостей показывает, что в некотором «идеальном» случае трения с коэффициентом  $\mu$ , близким к нулю, эквивалентные напряжения совпадают между собой и находятся в известном диапазоне  $\sigma_{\text{экр}} = (0,2..0,367) p_0$ , определенным в результате многочисленных опытов в работе [2] для разных групп материалов при оценке условного предела текучести.

С увеличением коэффициента трения  $\mu$  до 0,15 происходит монотонный рост эквивалентных напряжений растяжения позади индентора и одновременное их уменьшение перед ним, что связано с началом действия тангенциальной нагрузки. Максимальными эквивалентными напряжениями в области контакта при этих условиях являются напряжения сжатия  $\sigma_{\text{сж}} = 0,62 p_0$  на глубине  $z \approx 0,49a$ , которые до  $\mu < 0,25$  практически не зависят от коэффициента трения [10]. Именно в этой области контакта следует ожидать первое появление пластического течения материала.

При дальнейшем росте коэффициента трения эквивалентные напряжения сжатия, действующие в центральной области пятна, приближаются по своему значению к растягивающим напряжениям и при  $\mu > 0,3$  начинают преобладать над ними. Далее, при  $\mu \approx 0,4$  следует ожидать выхода области максимальных сжимающих напряжений на поверхность (рис. 5).

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения диаграмм изменения напряжений от степени деформации материала поверхности использовали методику скретч-тест на приборе «CSM Scratch Tester», заключающуюся в царапании поверхности алмазным индентором типа Роквелла с радиусом при вершине 0,2 мм при постепенно возрастающей нагрузке от 0,03 до 1 Н. При испытании регистрировали прикладываемую нагрузку  $F_n$ , глубину проникновения индентора в материал  $Pd$ , остаточную глубину деформации  $Rd$  и коэффициент трения  $\mu$ .

Для эксперимента были выбраны несколько полированных образцов без упрочняющей обработки: из титанового сплава ВТ6 ( $\nu = 0,32$ ), стали 20Х13 ( $\nu = 0,28$ ) и технической меди ( $\nu = 0,3$ ). После проведения испытаний по формулам (10)–(14) рассчитывали эквивалентные напряжения.

Степень деформации определяли по М. П. Марковцу как отношение глубины проникновения индентора под нагрузкой к его радиусу ( $Pd/R$ ). Заметим, что это отношение ли-

нейно зависит от величины эквивалентных напряжений [2]:

$$\sigma_{\text{экр}} = A \frac{P_d}{R}, \quad (16)$$

где  $A$  – числовой коэффициент, зависящий от упругих констант  $\nu$  и  $E$  индентора и испытуемого материала.

Полученные зависимости эквивалентных напряжений от средней степени деформации для испытанных образцов показаны на рис. 6–8.

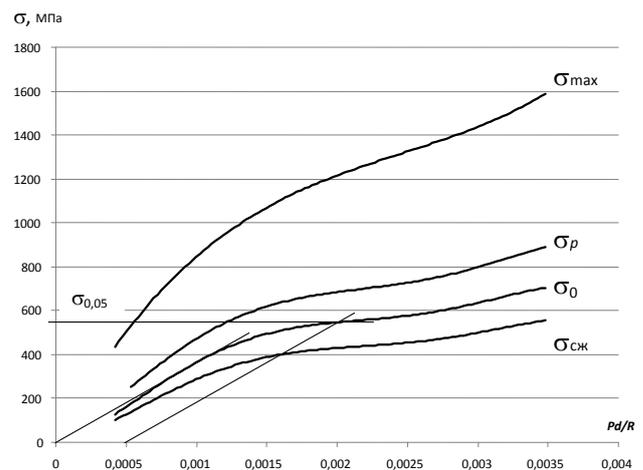


Рис. 6. Диаграмма напряжений при испытании образца из стали 20Х13 ( $\nu = 0,28$ ;  $\mu = 0,10$ )

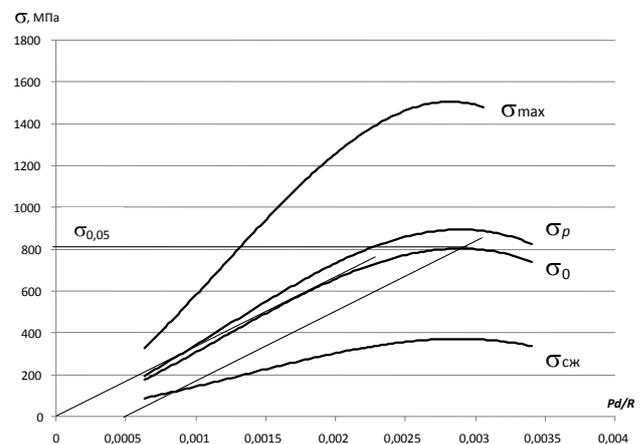
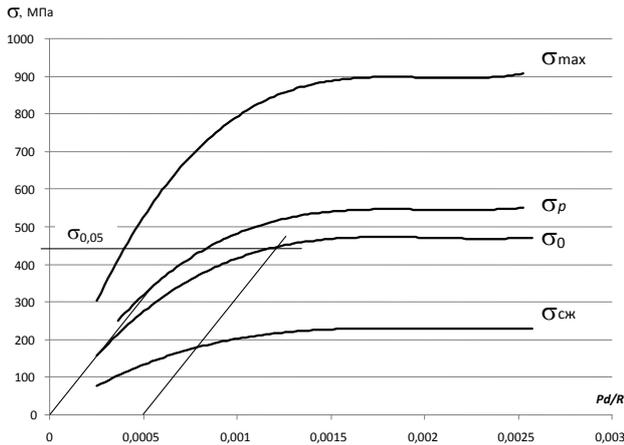


Рис. 7. Диаграмма напряжений при испытании образца из титанового сплава ВТ6 ( $\nu = 0,32$ ;  $\mu = 0,15$ )

Они охватывает область упругих и упруго-пластических деформаций и по физическому смыслу аналогичны диаграмме, получаемой при испытаниях на статическое сжатие [13], т. е. содержат в себе те же характерные точки пределов пропорциональности, упругости, текучести и др.



**Рис. 8.** Диаграмма напряжений при испытании образца из технической меди ( $\nu = 0,3$ ;  $\mu = 0,15$ )

Признаком появления первых остаточных деформаций при испытании является аномальное для упругой деформации увеличение площади контакта при незначительном росте нормальной нагрузки, что на диаграмме выражается в виде отклонения напряжений от начального прямолинейного участка. Как было уже отмечено выше, первое появление пластической деформации при малых коэффициентах трения следует ожидать под поверхностью, в области максимальных касательных напряжений. При этом зона пластичности мала и полностью охватывается материалом, находящимся в чисто упругом состоянии, так что пластические деформации практически полностью компенсируются упругими смещениями среды [10]. В этой связи можно предположить, что для выбранной схемы испытаний основными напряжениями, вызывающими проявление пластических деформаций в виде аномального увеличения площади контакта, являются сжимающие напряжения в центральной области  $\sigma_0$ . Необходимо отметить, что эти напряжения по величине несколько меньше растягивающих  $\sigma_0 < \sigma_p$  (рис. 5), но последние, по мнению автора, не оказывают заметного влияния на величину площади контакта, поскольку действуют за его пределами. Таким образом, анализируя кривые напряжений  $\sigma_0$  полученных диаграмм, можно с определенной точностью определить пределы упругости материалов испытанных образцов аналогично известным методам [2, 4].

Пределы упругости на полученных диаграммах находили по аналогии с методом испытания на сжатие [13]. Для этого восстанавливали прямую линию к начальной части кривой напряжений и проводили параллельную ей на

расстоянии 0,05% по оси степени деформаций. По точке пересечения этой прямой с диаграммой напряжений определили величину, аналогичную пределу упругости на сжатие  $\sigma_{0,05}$ , определяющую начало пластического деформирования материала на поверхности контакта с индентором. Результаты испытаний показаны на рис. 6–8, полученные величины напряжений приведены в таблице.

Статистический разброс точек и, как следствие, погрешность определения механических характеристик по диаграммам может быть значительно уменьшена повышением жесткости измерительной системы и тщательной подготовкой образцов, улучшением класса чистоты их поверхности.

Т а б л и ц а

**Напряжения начала пластического течения материала поверхности**

Материал образца	Условный предел текучести, МПа
Сталь 20X13	550 (490-655)
Титановый сплав ВТ6	810 (800-900)
Техническая медь	430 (300-450)

Примечание – в скобках указаны справочные значения пределов текучести [14].

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Свойства материала поверхности, во много определяющие прочностные и эксплуатационные свойства детали, в большинстве случаев заметно отличаются от свойств детали в объеме. В основном эта разница в свойствах связана с технологической наследственностью при изготовлении, применяемыми методами финишной, упрочняющей обработкой и эксплуатационными воздействиями. В этой связи развитие исследовательских методов определения механических и прочностных свойств материала поверхности является актуальной задачей.

Предложенный в статье подход по использованию эквивалентных напряжений в условиях трения для оценки механических свойств поверхности является продолжением известных работ по индентированию в применении к одному из универсальных и широко используемых на практике методов исследования «скретч-тест». Определенный с его помощью диапазон значений упругих и упруго-пластических напряжений хорошо согласуется с известными справочными данными для исследованных материалов, подтверждается численными расчетами методом конечных элементов и является статистически значимым, поскольку определяется на достаточно протяженном участке поверхности

(в работе от 3 до 5 мм). Предложенный способ может быть использован при оценке прочности поверхности после различной упрочняющей обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Головин Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 316 с. [[ Y.I. Golovin, *Nanoindentation and its capabilities*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2009. ]].

2. **Марковец М. П.** Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с. [[ M. P. Markovets, *Determination of mechanical properties of metal-hardness*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1979. ]].

3. **ASTM C1624.** Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, ASTM, 2010. [[ *Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*, ASTM C1624, 2010. ]].

4. **ГОСТ 22762-77.** Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. [[ *Metals and Alloys. Method of Measuring the Hardness at the Yield Point of the Ball Indentation*, (in Russian), Federal standard 22762-77. ]].

5. **ГОСТ Р 8.748-2011.** Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний. [[ *Metals and Alloys. Measurement of Hardness and Other Characteristics of the Materials in the Instrumental Indentation. Part 1: Test method*, (in Russian), Federal standard R 8.748-2011. ]].

6. **Огар П. М. и др.** Применение кривых кинетического индентирования сферой для определения механических свойств материалов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 1 (17). С. 41–47. [[ P. M. Ogar, et al., "Using of the sphere indentation kinetic curves to determine the mechanical properties of materials," (in Russian), in *Systems. Methods. Technology*, no. 1 (17), pp. 41-47, 2013 ]].

7. **Громаковский Д. Г.** Разработка концепции модели изнашивания и склерометрического способа оценки кинетических параметров разрушения поверхностей трения // Механика и машиностроение. 2011. Т. 13, № 4 (3). С. 699–703. [[ D. G. Gromakovsky, "Development of a wear and sclerometric concept model of estimating the kinetic parameters of the friction surfaces," (in Russian), in *Mechanics and machine-building*, vol. 13, no. 4 (3), pp. 699-703, 2011. ]].

8. **Шустер Л. Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с. [[ L. S. Shuster, *Adhesion of Solid Metals*, (in Russian). Ufa: Ghilem, 1999. ]].

9. **CSM Instruments.** Scratch Test [Эл. ресурс]. URL: <http://www.csm-instruments.com/scratch> (дата обращения 10.10.2014). [[ *CSM Instruments. Scratch Test* (2014, Nov. 10) [Online]. Available: URL: <http://www.csm-instruments.com/scratch> ]].

10. **Джонсон К.** Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с. [[ K. Johnson, *Contact Mechanics*, (in Russian). Moscow: Mir, 1989. ]].

11. **Биргер И. А.** Прочность, устойчивость, колебания. Т. 2 / Под общ. ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 463 с. [[ I. A. Birger, *Strength, Stability,*

*Vibrations*, vol. 2, Under Ed. I. A. Birger and Y. G. Panovko, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1968. ]]

12. **Попов В. Л.** Механика контактного взаимодействия и физика трения. М: Физматлит, 2012. 348 с. [[ V. L. Popov, *Contact Mechanics Physics and Friction*, (in Russian). Moscow: Fizmatlit, 2012. ]].

13. **ГОСТ 25.503-97.** Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. [[ *Methods of Mechanical Testing of Metals. Method of Testing Compression*, (in Russian), Federal standard 25.503-97. ]]

14. **Каблов Е. Н.** Авиационные материалы. Справочник в 12 т. / Всерос. НИИ авиац. материалов; под общ. ред. Е. Н. Кабловой. 7-е изд. перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2011. [[ E. N. Kabloev, *Aviation Materials. Directory of 12 b.*, Proc. Research Institute of Aviation. Under the Ed. E. N. Kabloev, 7<sup>th</sup> ed., revised and add., (in Russian). Moscow: VIAM, 2011. ]]

#### ОБ АВТОРАХ

**СЕЛИВАНОВ Константин Сергеевич**, доц., ст. науч. сотр. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж. по технол. машиностроения (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2000). Иссл. физ.-хим., структ.-фазового состояния и эксплуатационных свойств поверхностей.

#### METADATA

**Title:** Evaluation of the Surface Material Strength Using the "Scratch-Test" Method

**Authors:** K. S. Selivanov.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia

**Email:** K.Selivanov@mail.ru

**Language:** Russian

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 100-106, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Powered research equivalent stresses arising from the indentation, and the possibility of their application to assess the mechanical properties of the surface using one of the widely practiced method of investigating surface "Scratch-Test". An example of practical realization of the proposed method for of determining the mechanical properties was described.

**Keywords:** indentation; scratch test; surface; resistance; mechanical properties.

#### About the author:

**SELIVANOV, Konstantin Sergeevich**, Docent (Assoc. Prof.), Mechanical Engineering Dept. Bachelor and Dipl. Engineer in Mechanical Engineering (UGATU, 1997). Candidate of Science (PhD) Tech. Science in Mechanical Engineering (USATU, 2000). Research in physic-chemistry, structural-phase state and operational properties of the metal surface after ion implantation and vacuum plasma modification.