Твердость: 120 лет

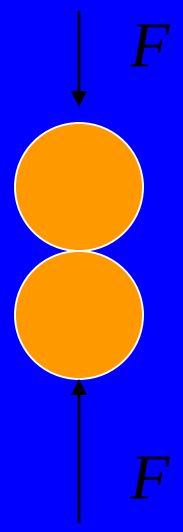
С. А. Федосов

Твердость:

- что же это такое;
- методы измерения.

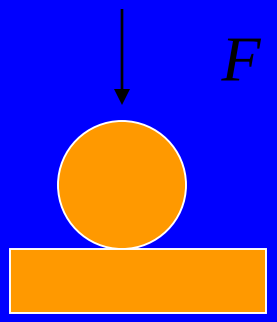
Метод Герца

(1892)



$$P_0 = 3/2\, p_m = \left(\frac{6 F E_r^2}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3}$$

где p_m – среднее контактное давление, E_r – приведенный модуль упругости контактирующих тел: $E_r = [(1 - \nu_m^2) / E_m + (1 - \nu_i^2) / E_i]^{-1}$, ν - коэффициент Пуассона, E_m и E_i модули упругости материалов образца и индентора.

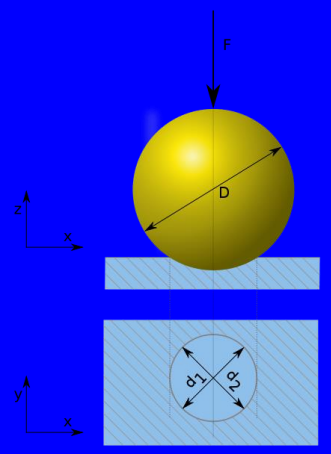


Опыты Ауэрбаха; критика Губера

(1891-1896) (1904)

Метод Бринелля

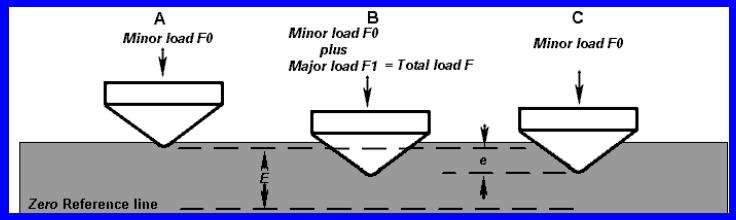
(1900)



HB = F / $S_{конт}$

Метод Роквелла

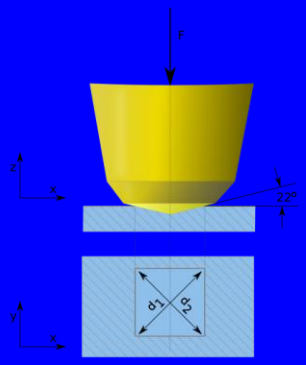
(1914)

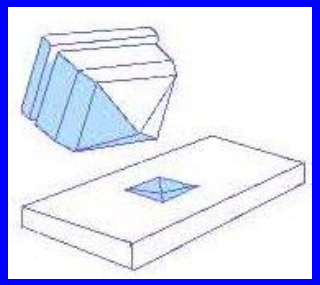


HRA = 100 - Δh / 0,002
HRB = 130 - Δh / 0,002
HRC = 100 - Δh / 0,002

Метод Виккерса

(1925)





HV = F / $S_{конт.}$

TIV метод ➔ ➔

Метод Мейера

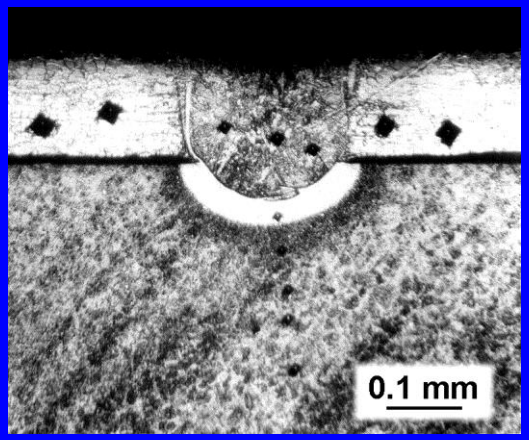
(1908)

HB = F / $S_{проекц}$

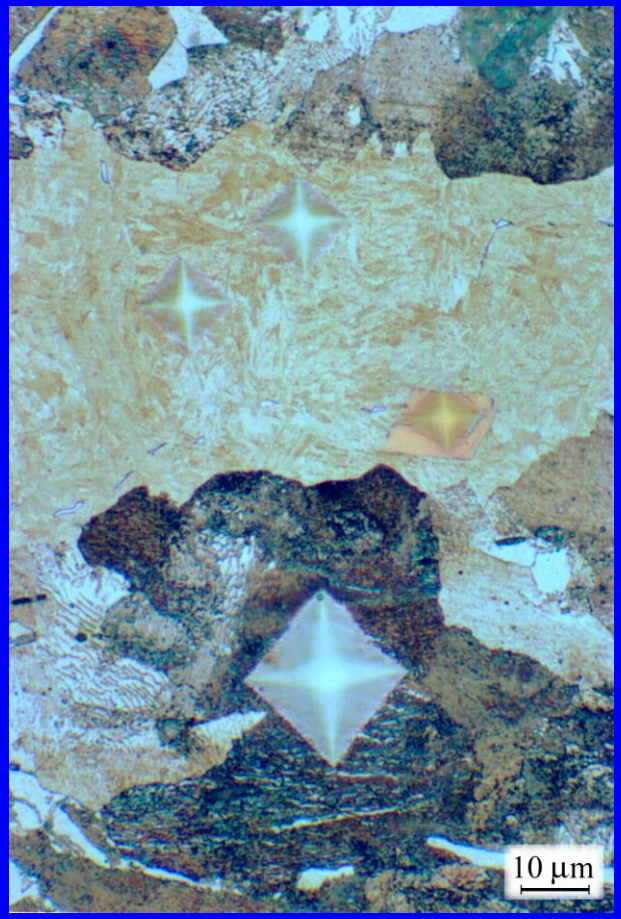
Метод Кубасова

(1909)

Метод Кнупа



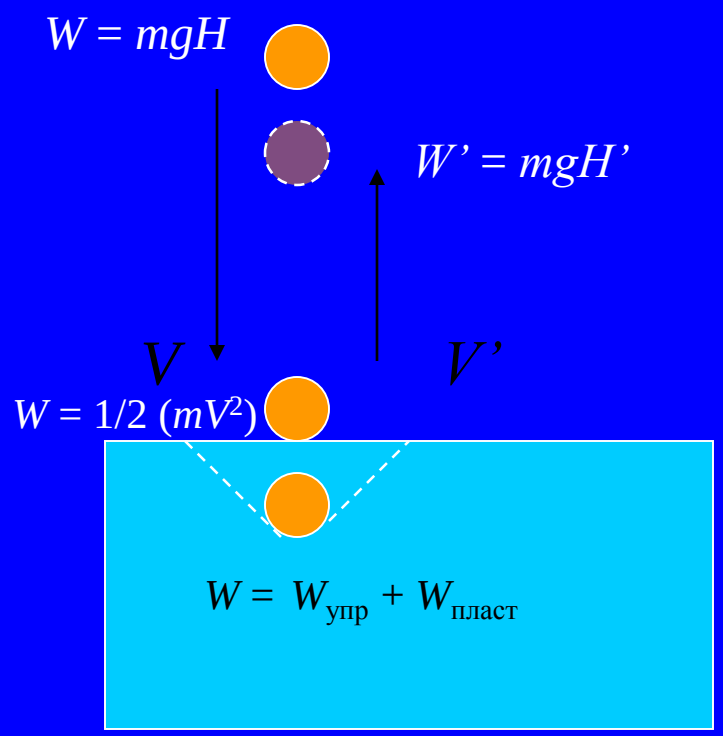
Поперечный шлиф сварной точки, полученной точечной лазерной сваркой ×100



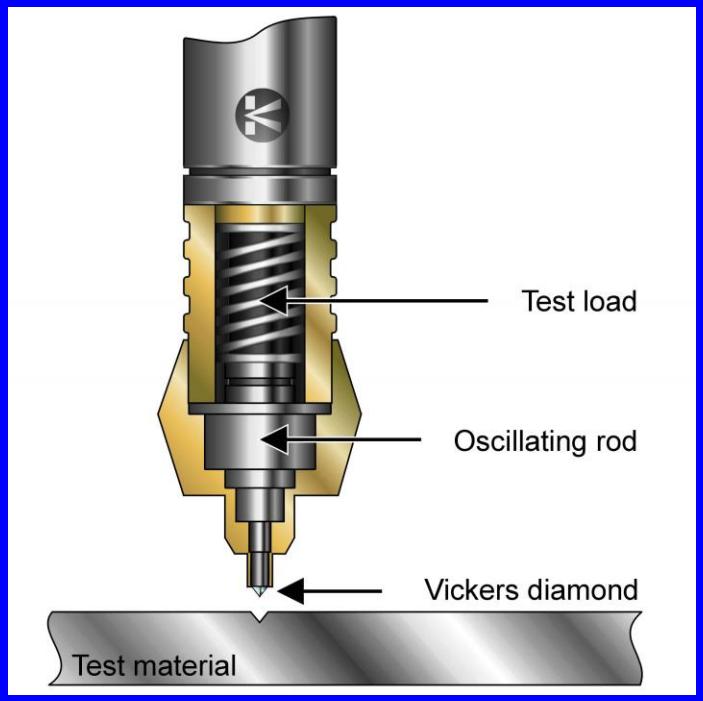
Сварочная дамасская сталь ×1000

Примеры отпечатков микротвердомера

Метод Шора
(1920-е)



Контактно-импедансный метод (UCI)
(1977)



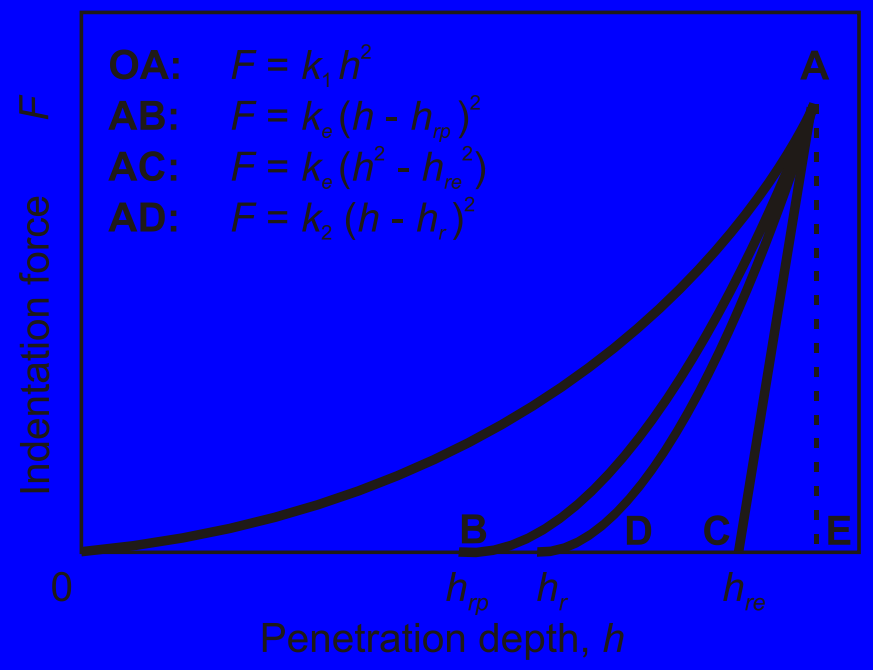
Метод Либа
(1975)

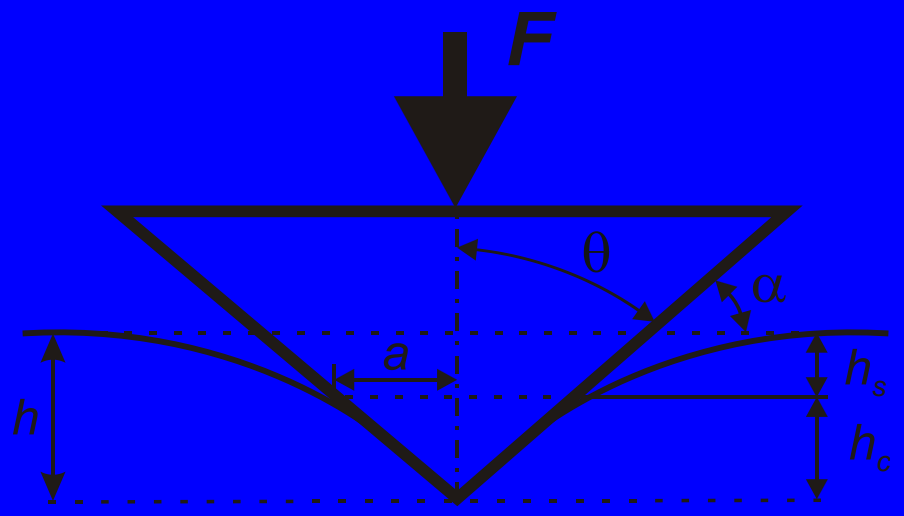
$$HL = (V / V') \times 1000$$

$$A_S = f_1 (E_i, \nu_i, E_m, \nu_m) \times f_2 (\Delta f / f_0)$$

$$HV = HV_{UCI} \left(\frac{1/E_n + 1/E_i}{1/E_m + 1/E_i} \right)^2$$

Кинетический метод
(Dept Sensing Indentation Testing - DSI)





Нагрузочно-разгрузочные кривые индицирования: 0A – нагрузочная ветвь; AD – реальная разгрузочная ветвь; AB и AC гипотетические разгрузочные ветви при, соответственно, полностью пластическом – и полностью упругом восстановлении отпечатков; F – индентирующая сила, h – заглубление индентора

$$S = \frac{dF_u}{dh_u} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_P}$$

Ультрамикротвердомер DUH-201S Shimadzu

Провели индентирование, измерили твердость.

Что дальше?

Связь твердости с прочностью

Уравнение Бринелля:

$$\sigma_u = 0{,}346\ \mathbf{HB}$$

где σ_u – условный предел прочности, HB – твердость по Бриннелю.

Уравнение Tabor-Марковца:

$$\mathbf{H} = C\,\sigma_r$$

где H – твердость по Виккерсу или Бриннелю, а σ_r – напряжение при одноосной “репрезентативной” деформации e_r; коэффициент $C = 3\ldots3{,}2$.

Уравнение Зайцева

$$\mathbf{H} \approx 2{,}94\,\sigma_в\,(1 - \delta_p^2)$$

где δ_p - равномерное удлиннение при испытании на растяжение.

Модель гидростатического ядра Джонсона:

$$p_m = \frac{2}{3}\sigma_r\left[1 + \ln\left(\frac{1}{3}\frac{Etg\alpha}{\sigma_y}\right)\right]$$

откуда $\mathbf{HV} = 0{,}93 p_m \approx 2{,}8\sigma_r$,

или $\mathbf{H_{IT}} \approx 3{,}0\sigma_r$.

Для материалов с иррегулярным законом твердения: (получено МКЭ моделированием)

$$\mathbf{H} = K_1\sigma_l + K_2\sigma_h\ ,$$

где σ_l и σ_h – напряжения, соответствующие одноосной деформации соответственно в 0,02 и 0,35, а K – коэффициенты: $K_1 = 1$, $K_2 = 1{,}4$ для индентора Виккерса и 1,55 для эквивалентного конического индентора.

ABI метод Хаггага (Haggag)

$e_p = 0{,}2\, d_p / D$; $\sigma_1 = 4F / \pi\, d_p^2\, \delta$;

где: $d_p = \{0{,}5\, C^* D\, [\, h_p^2 + (d_p / 2)^2] / [\, h_p^2 + (d_p / 2)^2 - h_p D\,]\}^{1/3}$;

$C^* = 5{,}47\, F\, (1/E_i + 1/E_s)$;

;

$\phi = e_p E^2 / 0{,}43\sigma_1$; $\delta_{max} = (1{,}12 \ldots 2{,}87)\alpha_m$; $\tau = (\delta_{max} - 1{,}12) / \ln (27)$.

Здесь σ_1 – истинное напряжение; e_p – истинная пластическая деформация; D – диаметр шарового индентора; d_p и h_p – диаметр и глубина восстановленного отпечатка; δ - параметр, зависящий от стадии развития пластической зоны под индентором; α_m - параметр, связанный с чувствительностью материала образца к скорости нагружения (например, для материалов с низкой чувствительностью к скорости нагружения $\alpha_m = 1{,}0$).

Измерение остаточных напряжений

Метод Суреша и Гианакопоулоса:

$$A_0 / A = 1 + (\sigma^R \sin\alpha) / p_{av} \qquad (+)$$

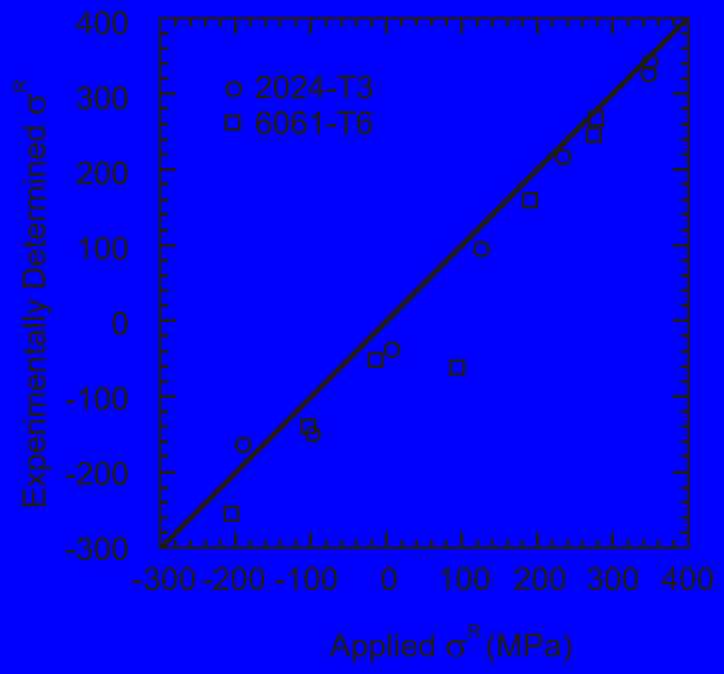
$$A_0 / A \approx 1 - (\sigma^R \sin\alpha) / p_{av} \qquad (-)$$

при $h = const$

$$h_0^2 / h^2 = 1 - \sigma^R / p_m \qquad (+)$$

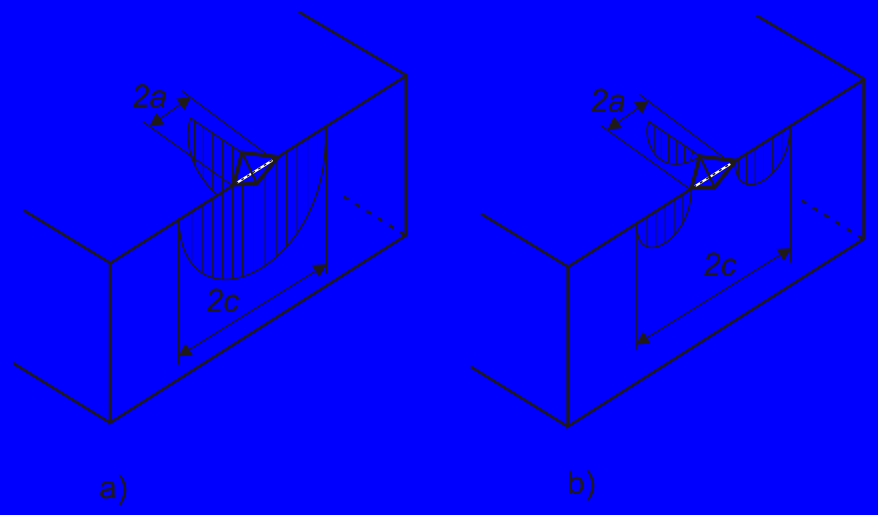
$$h_0^2 / h^2 \approx 1 + (\sigma^R \sin\alpha) / p_{av} \qquad (-)$$

при $F = const$



Определение параметра K_{1c} у хрупких материалов

$$K_{1c} = \chi_r F c^{-3/2}.$$



Геометрические параметры, используемые для расчета K_{1c} при индентировании хрупких материалов. Здесь c – радиус трещины, 2a = d – диагональ отпечатка Виккерса: a) полукруговая и b) бикруговая трещины.

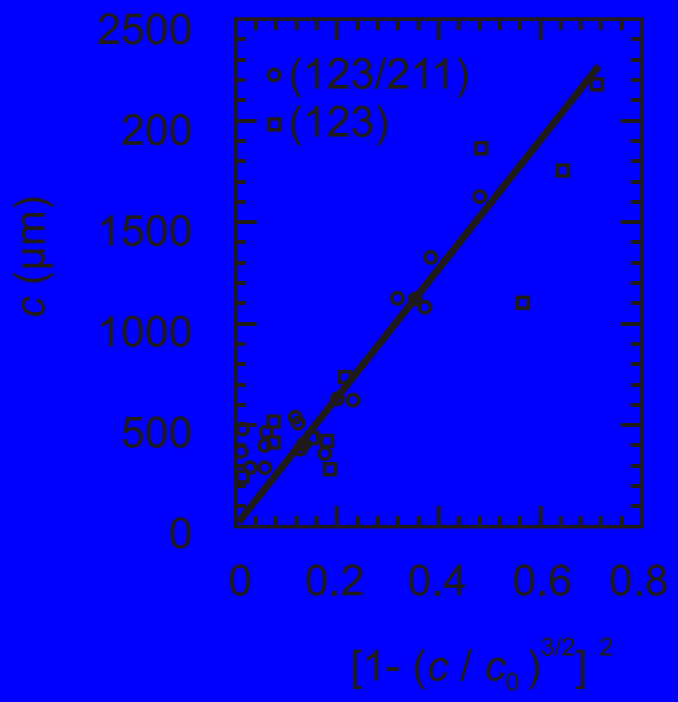
№ п/п	Тип трещины	Расчетная формула для K_{1c}	Литературный источник
1	M	$0{,}016\,(E/H)^{1/2}\,(F/c^{3/2})$	[188]
2	M	$0{,}16\,H\,a^{1/2}\,(c/a)^{-3/2}$	[189]
3	M	$H\,a^{1/2}\,(E/H)^{0,4}\,10^{x}$	[190]
4	M	$0{,}067\,H\,a^{1/2}\,(E/H)^{0,4}\,(c/a)^{-3/2}$	[191]
5	P	$0{,}018\,H\,a^{1/2}\,(E/H)^{0,4}\,(c/a - 1)^{-1/2}$	[191]
6	P	$0{,}073\,H\,a^{1/2}\,(E/H)^{0,4}\,(c/a)^{-1,56}$	[192]
7	P	$0{,}0889\,(H\,F/4l)^{0,5}$	[193]
8	P	$0{,}015\,(l/a)^{-0,5}\,(E/H)^{2/3}\,(F/c^{3/2})$	[194]
9	M	$0{,}01\,(E/H)^{2/3}\,F/c^{3/2}$	[195]
10	M	$0{,}028\,(H\,a^{1/2})\,(E/H)^{1/2}\,(c/a)^{-1/2}$	[196]

Тип трещин: M – полукруговая монотрещина, P – бикруговая политрещина Палмквиста; E – модуль Юнга; H – твердость; F – индентирующая сила; $x = f\,(c/a)$; $l = c - a$.

Оценка термостойкости

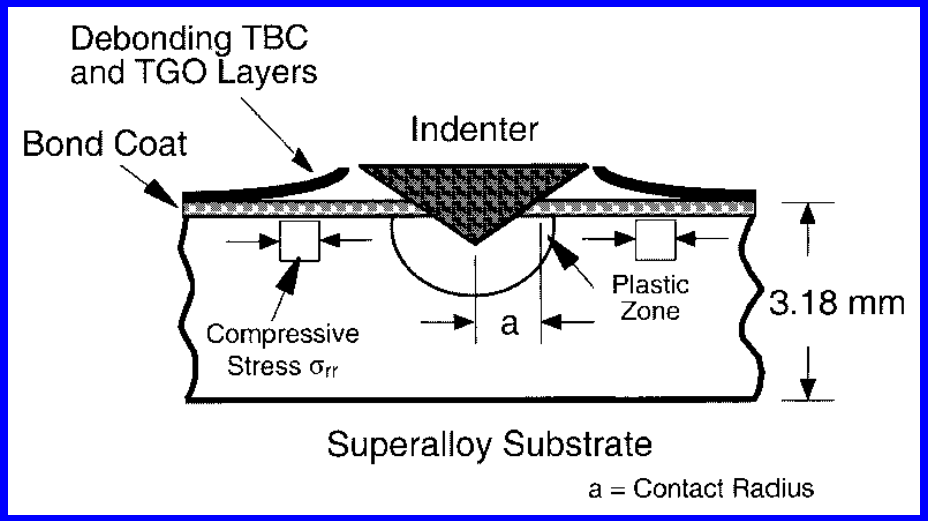
$$R_m = \left(\frac{K_c}{\sigma_{th}}\right)^2 = \frac{\pi\Omega c}{\left[1-\left(\frac{c}{c_0}\right)^{-3/2}\right]^2}$$

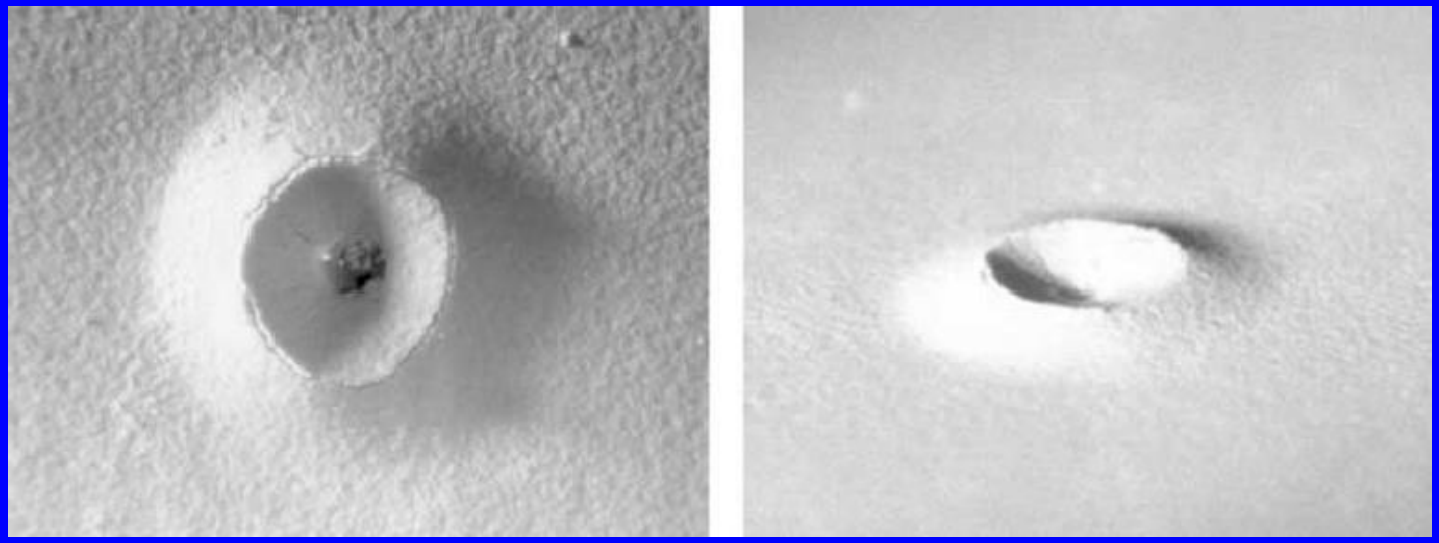
(здесь $\Omega = 4\pi^2$)



Зависимость c от $[1-(c/c_0)^{-3/2}]^2$ для $YBa_2Cu_30_{7-x}$ керамики (123) и для $YBa_2Cu_3O_{7-x}/Y_2BaCuO_2$ керамики (123/211), закаленных в жидкий водород

Определение адгезии покрытий





Фотография накола индентором Роквелла на термозащитном покрытии лопаток турбин

«Мягкое покрытие на жесткой подложке»:

$$G = \frac{0,627 H_f^2 t (1-\nu_f^2)}{E_f [1+\nu_f + 2(1-\nu_f) H_f R^2 / F]^2}$$

где H_f - твердость покрытия, t - толщина покрытия, R - радиус линзы отслоения (граничной трещины), F - нагрузка, а ν_f и E_f - коэффициент Пуассона и модуль упругости материала покрытия

<u>Энергия адгезии DGEBA покрытия на силикатном стекле (эксперимент):</u>

Индентированием	25,2 (±8,7) Дж/м^2
двойной консольной балки	8,1 (±1,7)
четырехточечного изгиба	15,0 (±0,4)

«Жесткое покрытие на мягкой подложке»

$$\frac{2G(1-\nu)^2}{E^{eff}} = \left\{ \varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta - \frac{(1-\nu^2)\varepsilon_\theta \left[1-\left(\frac{R_i}{R}\right)^2\right]}{1-\nu) + (1+\nu)\left(\frac{R_i}{R}\right)^2} \right\}^2$$

$$2G = \frac{3(1-\nu^2)(\sigma_0^{TGO} - \sigma_0^{TBC})^2 t_{TGO}^2}{(t^{TGO} + t^{TBC}) E^{TBC}}$$

где: $K = \sqrt{\frac{G E_r^{TGO}(1-\alpha)}{1-\beta^2}}$ $\quad \alpha = \frac{E_r^{TGO} - E_r^{Bondcoat}}{E_r^{TGO} + E_r^{Bondcoat}}$

$$\beta = \frac{\mu^{TGO}(k^{Bondcoat} - 1) - \mu^{Bondcoat}(k^{TGO} - 1)}{\mu^{TGO}(k^{Bondcoat} + 1) + \mu^{Bondcoat}(k^{TGO} + 1)} \qquad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

(Совпадение с табличными данными по порядку величины)

Определение адгезионных свойств волокнистых композитов

$$u = F^2 / 4\pi^2 r^3 \tau E_f - 2\Gamma / \tau,$$

где 2Γ - поверхностная энергия разрушения на единицу площади раздела, c - длинна срыва адгезии (оценка c была произведена из баланса энергий). В отсутствии адгезии ($\Gamma = 0$) $c = l$

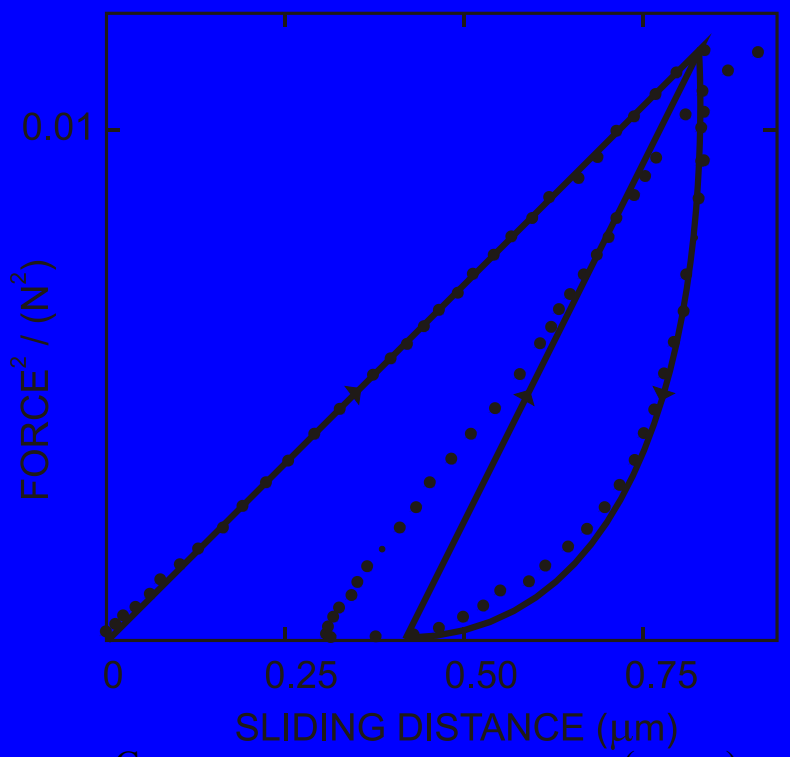
При учете деформации матрицы:

$$n = \frac{nE}{\sigma_0}$$ при $\sigma_0 \le \sigma_d$;

$$u = \frac{1}{2nE}\left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_d} + \sigma_d\right)$$ при $\sigma_0 > \sigma_d$;

$$u = \frac{1}{2nE}\left(\frac{\sigma_{\max}^2}{\sigma_d} + \sigma_d + 2(\sigma_0 - \sigma_{\max})\right)$$ при $\sigma_S \le \sigma_0 \le \sigma_{max}$;

$$u = \frac{1}{2nE}\left(\frac{\sigma_{\max}^2}{\sigma_d} - \sigma_d - \frac{(\sigma_0 - \sigma_{\max})^2}{2\sigma_d}\right)$$ при $\sigma_0 \le \sigma_S$



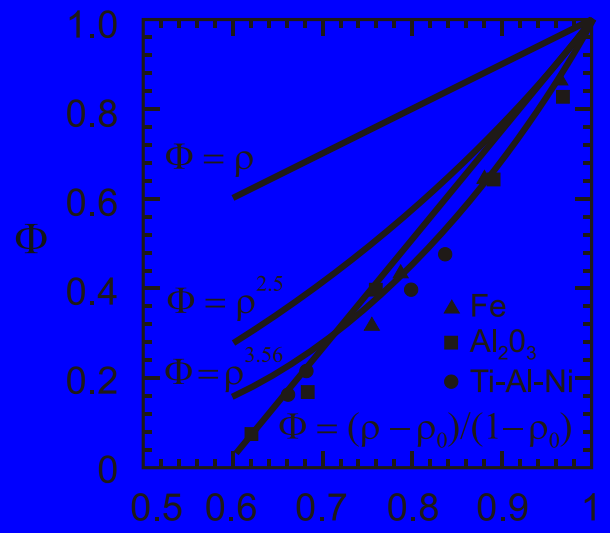
Сравнение экспериментальных (точки) и теоретических (линии) нагрузочных кривых при индентировании торца волокна композита

Здесь , $n = \sqrt{\frac{2k}{rE}}$ где k – глобальная жесткость, такая, что $\tau = kw$. , $k = \frac{G}{r \log\left(\frac{R_{eq}}{r}\right)}$ при условии, если матрицу представить в виде цилиндра радиусом R_{eq}, вне которого ее деформации равны 0 (в первом приближении R_{eq} может быть принят равным среднему расстоянию между соседними волокнами). При этом длина срыва адгезии $c = (r\sigma_0 / 2\tau_d) - 1/n$, а $\sigma_d = 2\tau_d / rn$.

Определение пористости

В общем случае: $\boldsymbol{\sigma_\rho = \Phi\, \sigma_0}$
где σ_ρ есть напряжение пластической деформации при одноосном сжатии материала с относительной плотностью ρ, σ_0 - то же в монолитном состоянии, а $\boldsymbol{\Phi = f(\rho)}$ - функция относительной плотности.

Так как $H \sim \sigma$, то определив относительную твердость $\boldsymbol{H_\rho / H_0}$, можно рассчитать ρ, если известно Φ.



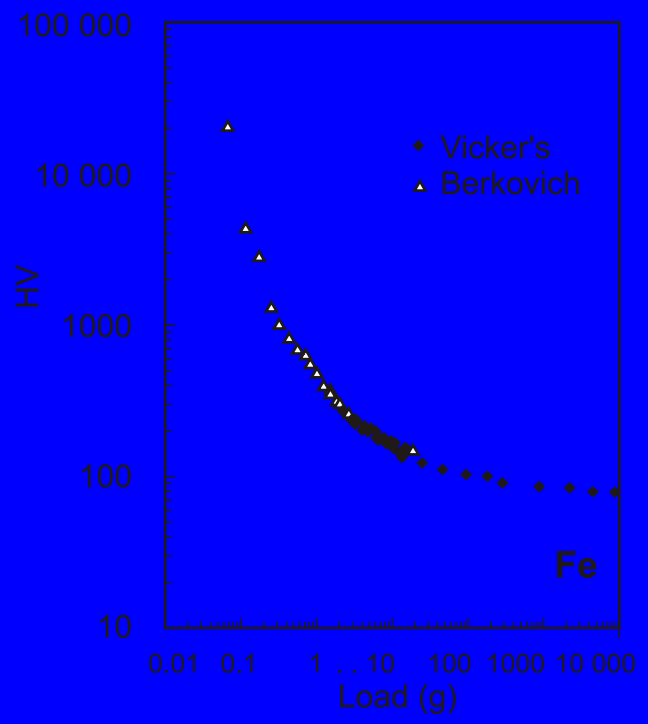
$\Phi = \rho$;
$\Phi = \rho^{2,5}$;
$\Phi = \rho^{3,56}$
$\Phi = exp\,[-a\,(1 - \rho)]$;
$\Phi = (2\rho^2 - 1)^{0,5}$;
$\Phi = (\rho - \rho_0) / (1 - \rho_0)$

Сравнение различных функций интенсификации напряжений в пористых телах Φ с экспериментальными данными

(принято $\rho_0 = 0,6$)

Осложняющие факторы

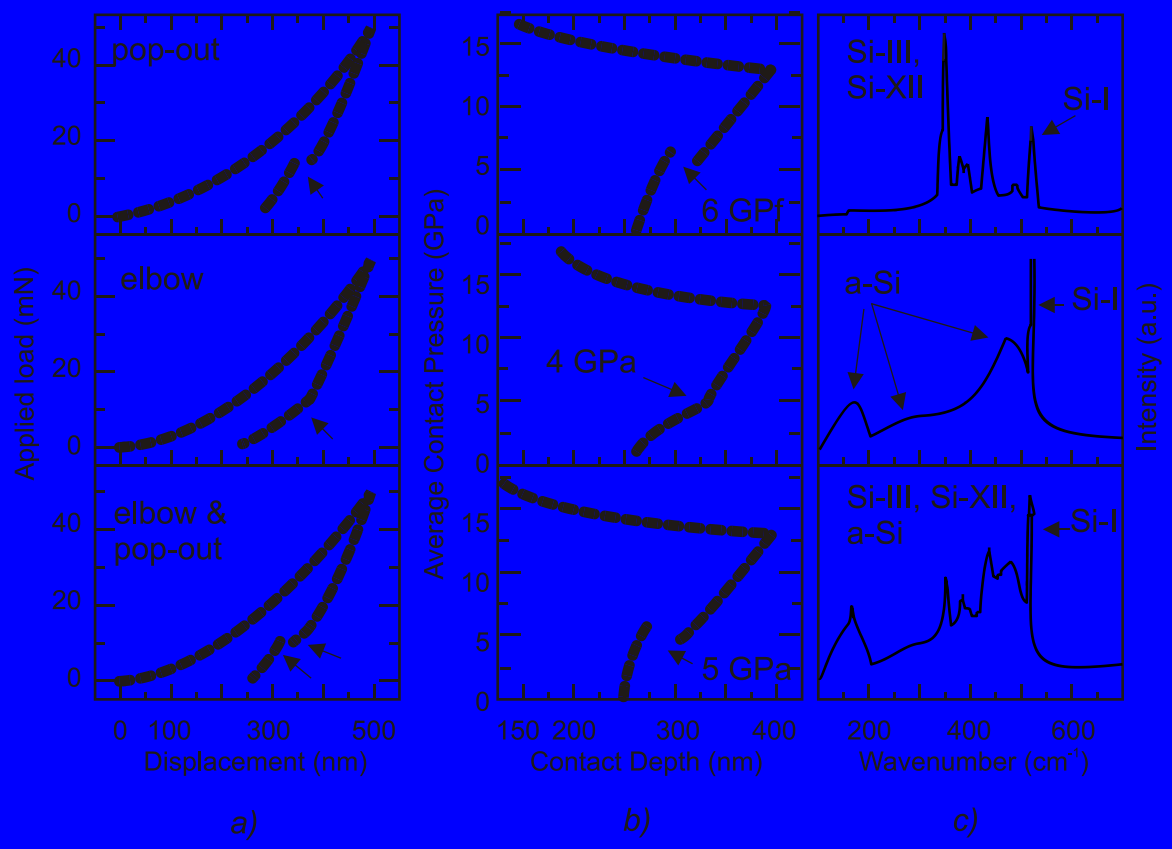
Размерный эффект



Влияние нагрузки на измеренную твердость технического железа

Основные причины:
i) влияние внешних вибраций;
ii) наклеп поверхности образца при полировке;
iii) увеличение относительной погрешности измерения размеров отпечатка;
iv) большей относительной долей упругого восстановления для маленьких отпечатков;
v) индентирование “бездислокационных” объемов с твердостью, приближающейся к теоретическому пределу, когда размер отпечатка становится соизмерим с междислокационными расстояниями;
vi) наклеп во время индентирования; vii) влияние границ зерен и включений;
viii) увеличение относительного влияния несовершенства индентора при уменьшении отпечатка, большее для индентора Виккерса, меньшее для Берковича.

Фазовые превращения под индентором



Величина пластической деформации под индентором

<u>Классика:</u>	
Tabor	**8%**
Марковец	**6%**
(результаты получены анализом впечатанных сеток)	
Геометрический анализ на основе формулы Марковца	6,2%
Регрессионная подгонка экспериментальных результатов к уравнению Tabor-а	8-11%
Модель гидростатического ядра Джонсона	7%
2D МКЭ моделирование Большакова	10%
3D МКЭ моделирование Гианнакопоулоса ***(за рубежом признано стандартом de-facto)***	**29-30%**
Безразмерный П-анализ	3,3%
МКЭ моделирование Чаудхри	25…36 %
Эксперименты по индентированию меди Чаудхри	5…6 % (у поверхности) 25…36 % (у вершины) 200% (под вершиной)