

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Измерването на твърдост по класическите методи се свежда до деформация на изследваната повърхност. Това става с тяло от много твърд материал. Измерва се или площта на следата, която се оставя, или дълбочината на проникването в тествания обект, в следствие прилагането на известно тегло. Най-често използвани са методите и съответните скали на Бринел, Викерс, Рокуел и др., които се отличават най-вече по формата на тялото, с което се мери (сфера, призма...) и се прилагат в зависимост от материала, чиято твърдост се мери.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Методът на Рокуел е основан на принципа на измерване дълбочината на проникването в тествания обект.

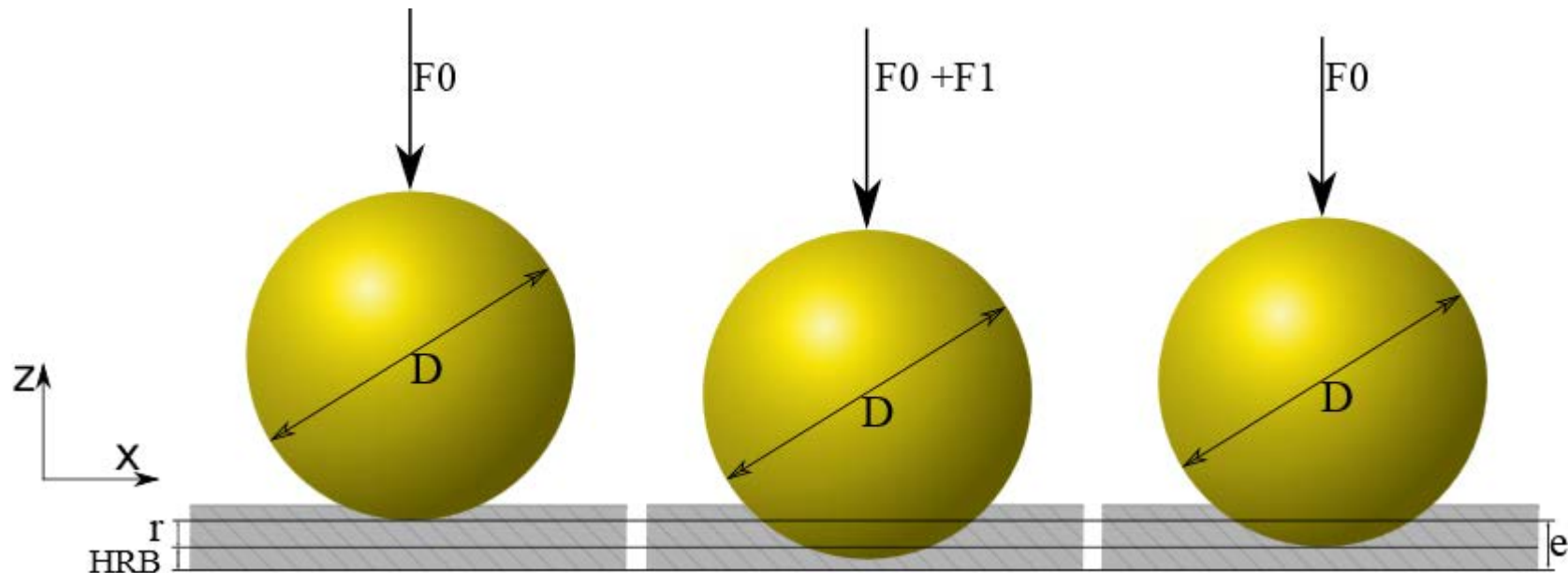
Методите на Бринел и Викерс използват принципа на измерване на площта на следата, която се оставя, след прилагане на известно тегло.

Въпреки че е невъзможно в много случаи да се даде точно преобразуване между различните скали, може да се даде приблизителна сравнителна таблица, за специфични материали, напр. стомани.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Определянето на твърдостта на материала по Рокуел включва прилагането на малък товар, последван от голям товар.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Малкият товар (10 kgf) създава нулева позиция. Основното натоварване се прилага, след което се отстранява, като се запазва минималното натоварване. Дълбочината на проникване от нулевата точка се измерва. Тя е обратно пропорционална на твърдостта - HR.

$HR = N - \frac{d}{s}$ , където  $d$  – дълбочината от нулевата точка в mm,  $N$  и  $s$  – коефициенти на съответните скали.

HRA –  $N = 100$ ,  $s = 0,002$  mm, 60 kgf основно натоварване

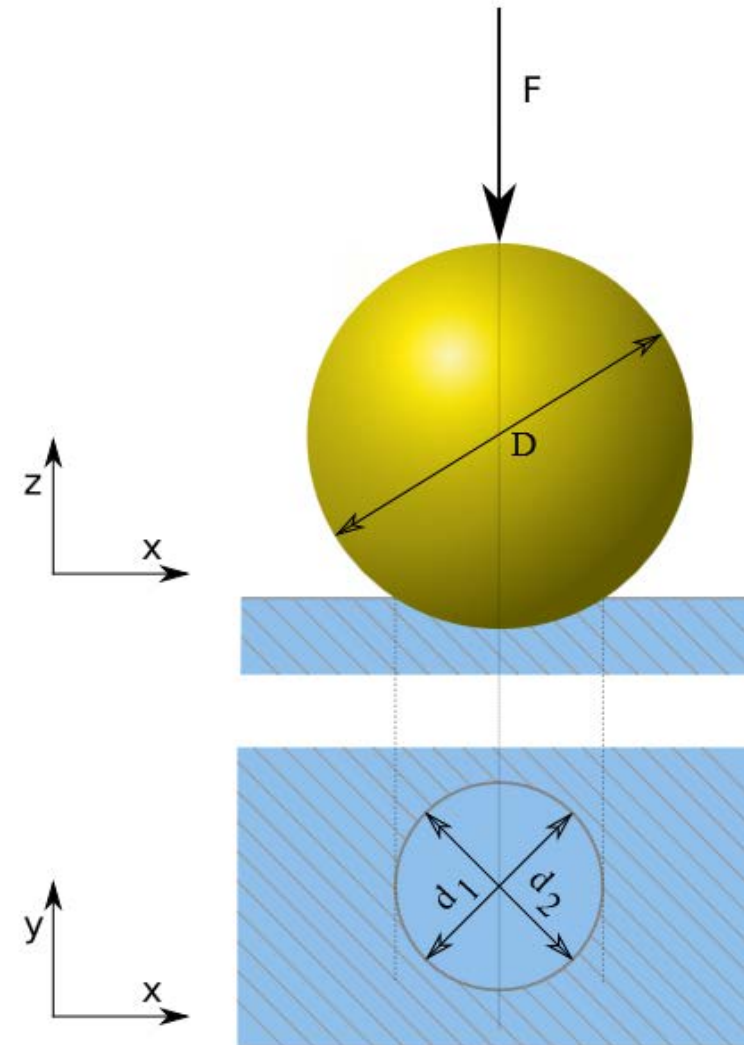
HRB –  $N = 130$ ,  $s = 0,002$  mm, 100 kgf основно натоварване

HRC –  $N = 100$ ,  $s = 0,002$  mm, 150 kgf основно натоварване

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Типичният тест по Бринел използва стоманена сфера с диаметър от 10 mm (0,39") като индентор със сила от 3000 kgf (29,42 kN; 6,614 lbf). За по-меки материали се използва по-малка сила; за по-твърди материали, сфера от волфрамов (W) карбид (изключително твърд материал) заменя стоманената сфера.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Вдлъбнатината се измерва и твърдостта се изчислява чрез израза:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ където}$$

BHN е твърдостта по Бринел (kgf / mm<sup>2</sup>);

P - приложеното натоварване в килограм-сила (kgf);

D - диаметър на индентора (mm);

d - диаметър на вдлъбнатината (mm).

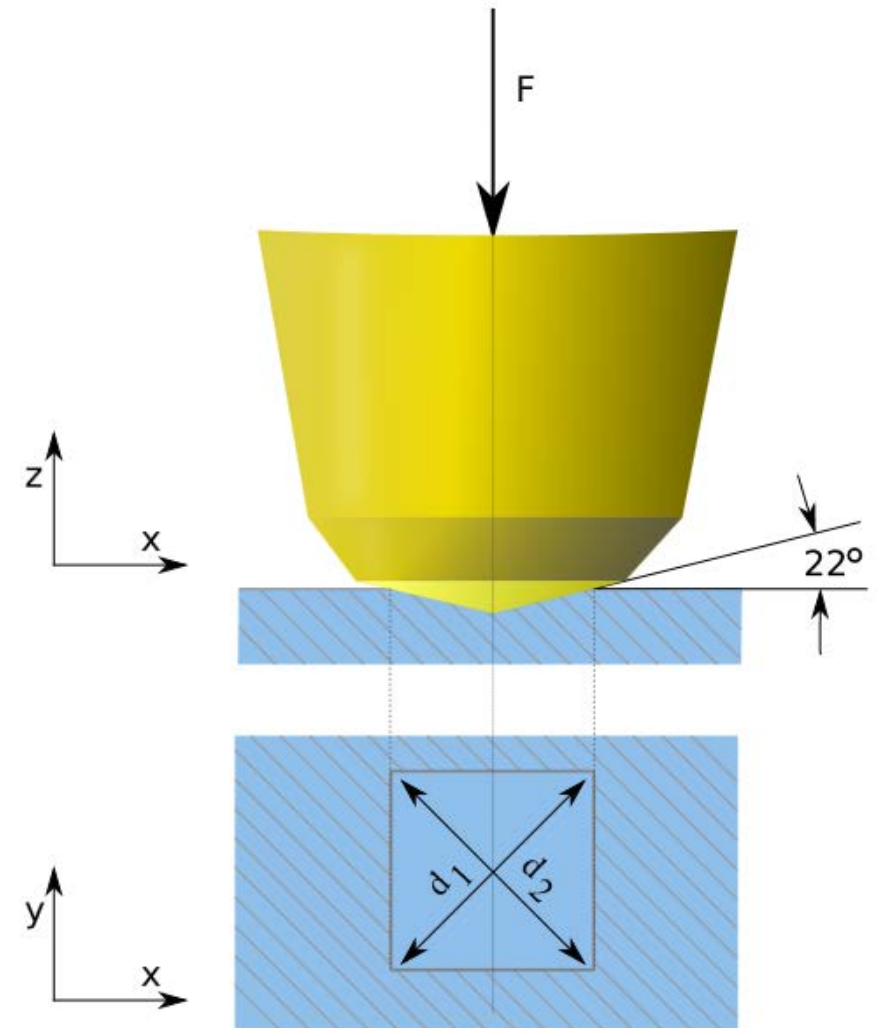
$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ където } W \text{ – волфрам, } F \text{ – силата в нютони (N).}$$

(1 N = 0,1019716213 kgf)

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Тестът по Викерс често е по-лесен за използване от подобни тестове, тъй като необходимите изчисления са независими от размера на индентора, а инденторът може да се използва за всички материали, независимо от твърдостта. Основният принцип е да се наблюдава способността на материала да устои на пластичната деформация от стандартен източник.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Тестът по Викерс може да се използва за всички метали и има една от най-широките скали при тестовете за твърдост. Единицата за твърдост, дадена от теста, е известна като пирамида на Викерс (HV) или диамантена пирамидална твърдост (DPH). Площта на следата –  $A$ , оставена след прилагането на теглото приблизително е:  $A \approx \frac{d^2}{1,8544} [\text{mm}^2]$ .

$$\text{HV} = \frac{F}{A} \approx \frac{1,8544F}{d^2} \text{ [kgf/mm}^2\text{]},$$
 където  $d$  – средна дължина на диагонала, оставен от индентора в mm,  $F$  – силата в kgf.

$$\text{HV} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \text{ [N/mm}^2\text{]},$$
 където  $d$  – средна дължина на диагонала, оставен от индентора в mm,  $F$  – силата в N.



# Измерване на твърдост на метали

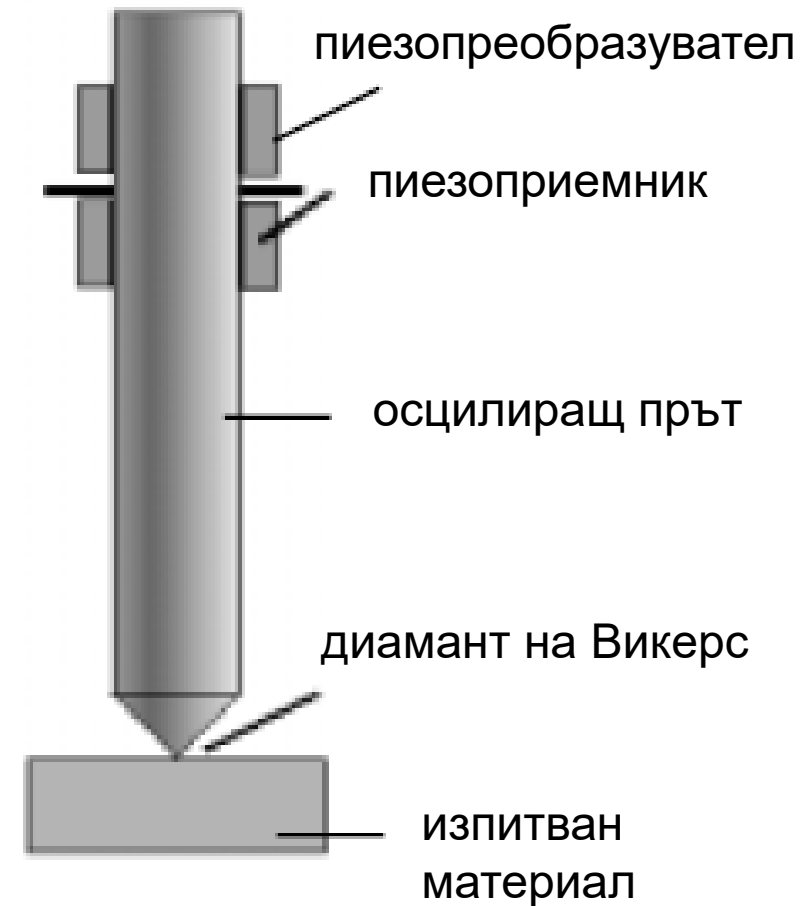
## Методи за измерване на твърдост на метали

Традиционните тестове за твърдост по Викерс или Бринел изискват оптична оценка на площта на следата, получена от приложения известен товар. Измерване на диагоналите на тестовата следа, които трябва да бъдат известни, за да се определи стойността на твърдостта по Викерс, обичайно не се оценяват оптично, но площта на следата може да се определи по електронен път чрез измерване на изместването на ултразвукова честота с използване на ултразвуков контактен импеданс метод - UCI (Ultrasonic Contact Impedance).

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

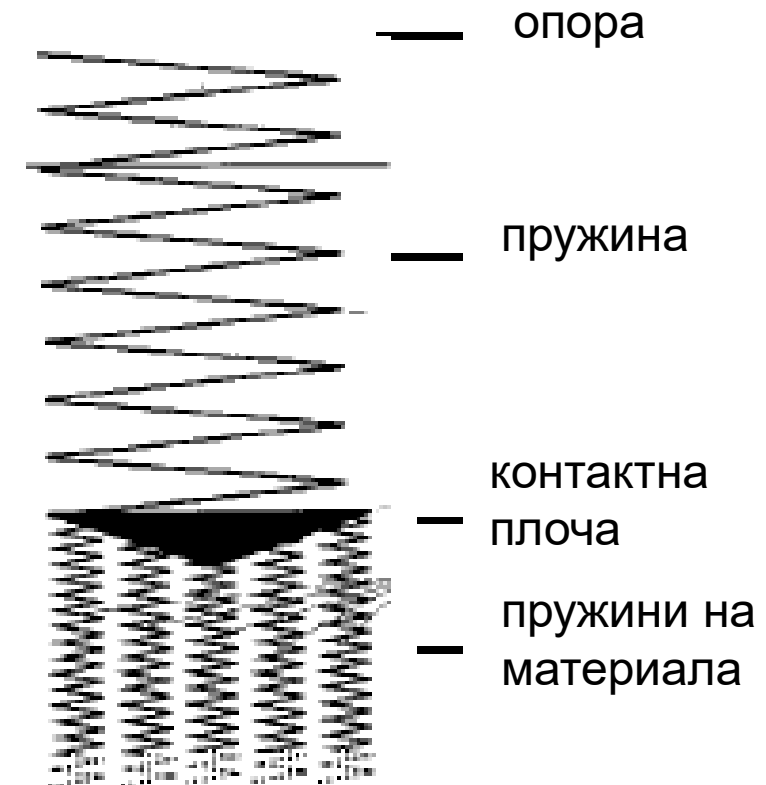
UCI измервателната сонда се състои от диамант на Викерс, прикрепен към края на метален прът. Този прът е възбуден в надлъжна осцилация с честота от около 70 kHz чрез пиезоелектрични преобразуватели. Прътът може да се разглежда като голяма спирална пружина, закрепена в единия край, а другият край свободно осцилиращ с резонансната честота. Към свободния край е прикрепена контактна плоча, диамантът на Викерс.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Повърхността на изпитвания материал може да се разглежда като система от по-малки спирални пружини, разположени вертикално към повърхността, а количеството на тези пружини - представляващо еластичните свойства (константи) на материала  $E_{\text{elast}}$ .



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Принципът на изпитанието за твърдост с използване на UCI е, че изместването на честотата е пропорционално на площта на тестовата следа, произведена от диаманта на Викерс.

При много твърд материал се образува малка вдлъбнатина, позволяваща само няколко от тези "атомни пружини" да контактуват с диаманта, което води до леко изместване на честотата.

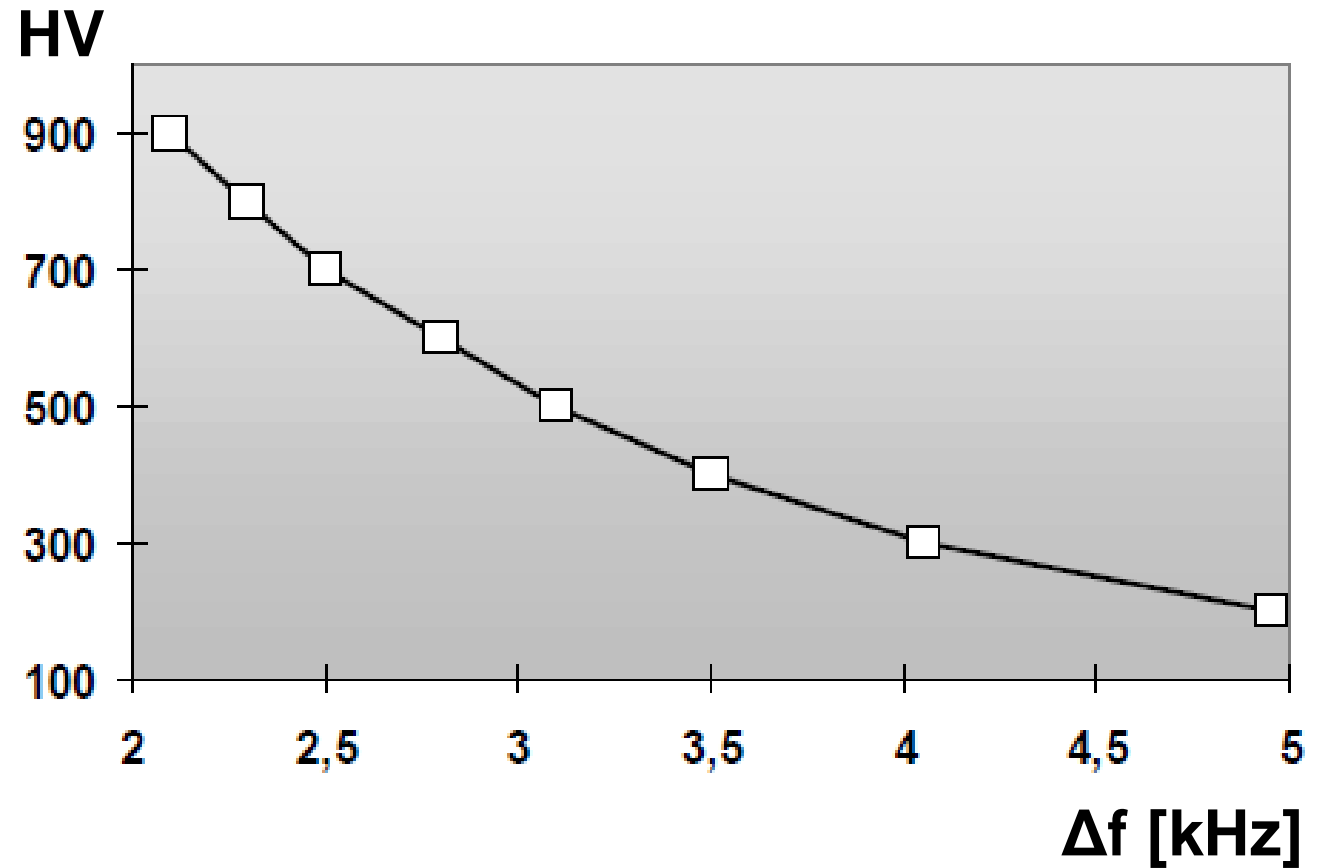
Ако по-мека част се изпитва, проникването на диаманта е по-дълбоко и честотното изместване е значително по-голямо, тъй като се докосват повече допълнителни "пружини".

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

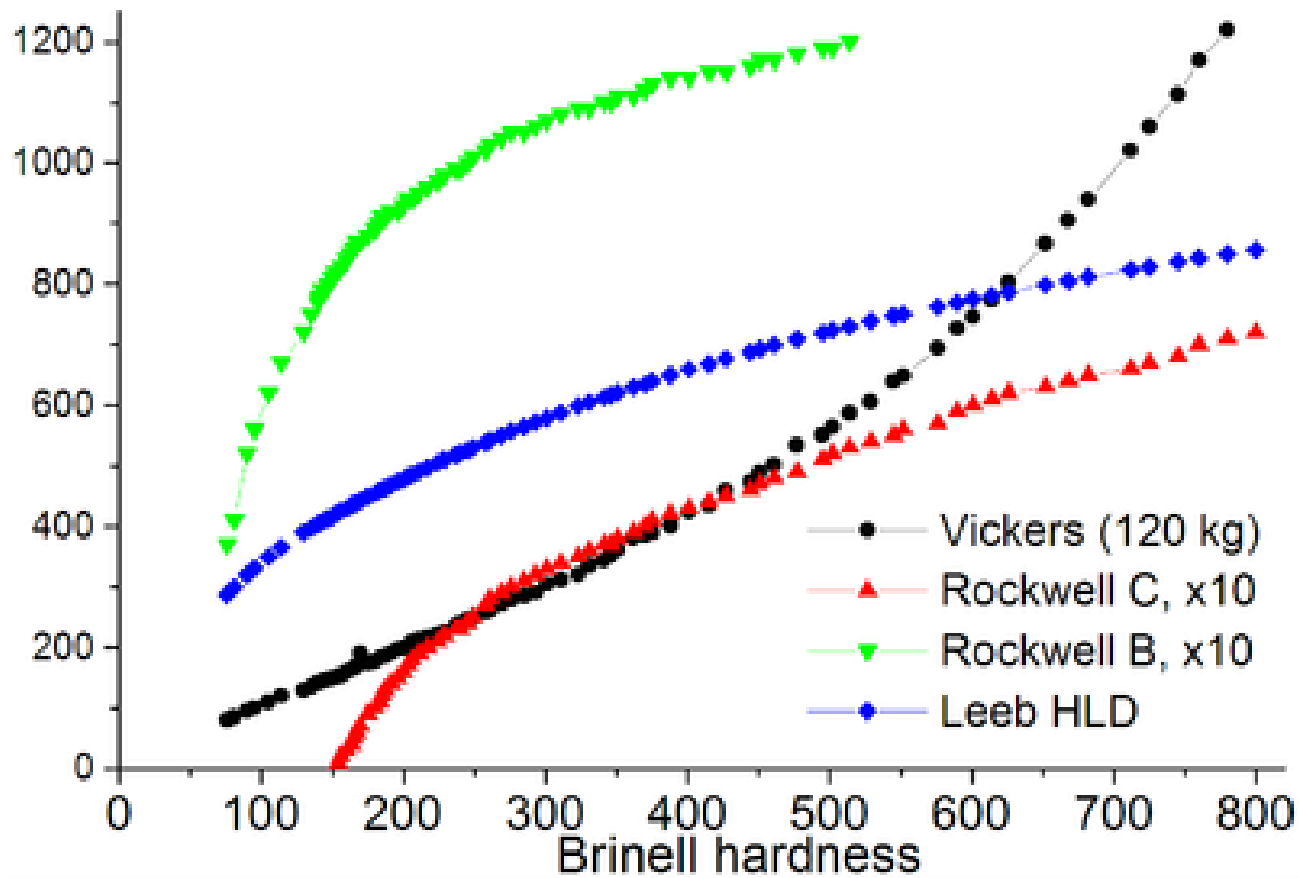
Зависимостта между стойността на изместването на честотата и площта на тестовата следа се дава с израза:

$$\Delta f \approx E_{elast} \cdot \sqrt{A}$$



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали



Бринел HB (10 mm сфера, 3000 kg)

Викерс HV (120 kg)

Рокул С HRC (120° конус 150 kg)

Рокул В HRB (120 1/16" сфера 100 kg)

Лийб HLD

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Последният от сравняваните в предната фигура най-често използвани методи за измерване твърдост на метали е изобретен от Д. Лийб и е много по-съвременен (1975). Този метод се прилага основно за тестване на достатъчно големи детайли (главно над 1 kg) и може да се използва в преносими уреди, което го отличава от останалите.

При този метод твърдостта се измерва индиректно чрез загубата на енергия от т. нар. ударно тяло (индентор). Още се нарича метод на рикошета (отскока) - Rebound.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Принципът на метода се състои в ускоряване на ударно тяло с известна маса до повърхността на тестовия обект, което попада върху нея с определена скорост, т.е. кинетична енергия. Ударът създава пластична деформация на повърхността (вдлъбнатина), поради което ударното тяло губи част от първоначалната си скорост – или енергия. То ще загуби повече енергия, като създаде по-голяма вдлъбнатина, което означава по-мек материал. Стойността на твърдостта по Лийб, HL, се изчислява чрез съотношението на скоростите на удара и отскока. След умножение по различни коефициенти тя се преобразува в някоя от известните скали.



# Измерване на твърдост на метали

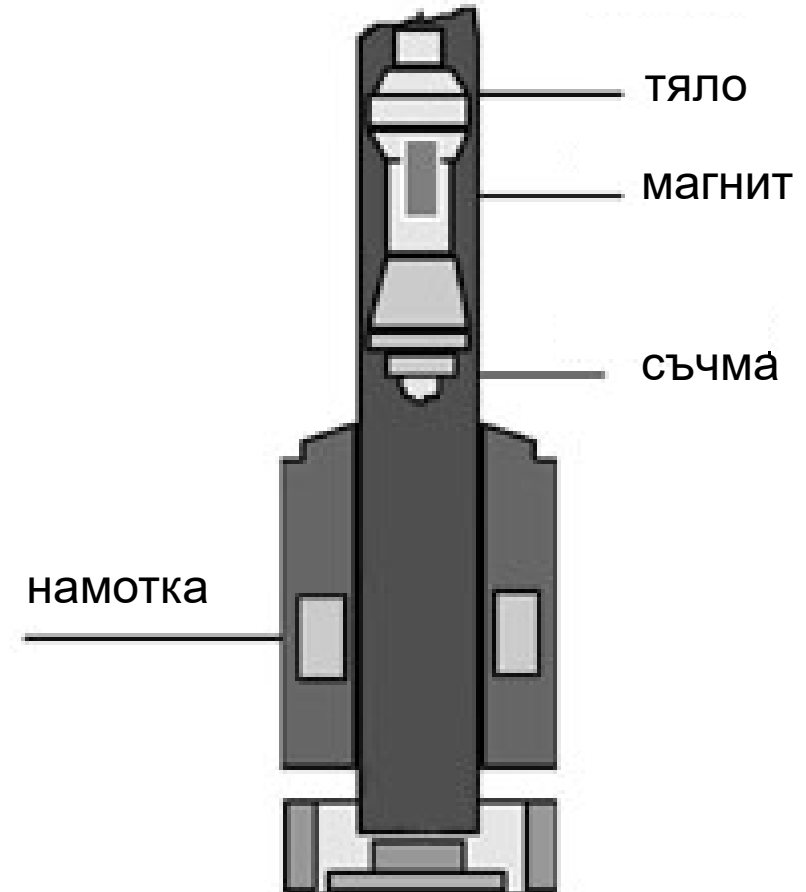
## Методи за измерване на твърдост на метали

Технически, този принцип на измерване се прилага чрез ускоряване на ударно тяло, което има сферичен накрайник от волфрамов карбид, към изпитвателната повърхност от силата на пружина. При измерването има изисквания към изпитвателната повърхност за грапавост, чистота и др. Скоростите след и преди удара се измерват безконтактно. Това се прави чрез малък постоянен магнит в ударното тяло, който индуцира напрежение по време на преминаването си през намотка, като това напрежение е пропорционално на скоростта. Колкото изпитваният материал е по-твърд, толкова отношението на двете скорости е по-близко до единица.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Измервателната глава е цилиндър с размерите на писалка. От едната страна на тяло със специфична форма е закрепена съчма от волфрамов карбид. “Писалката” се поставя перпендикулярно на измерваната повърхност и тялото със съчмата се изстрелва към повърхността, удря се и отскача.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали



Типично приложение на преносим уред за измерване твърдост на метали по метода Rebound.

Варианти на измерватели EQUOTIP на фирмата PROCEQ SA, за която е работил Д. Лийб. Принципът на работа е един и същ, но приложението е различно.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Получаването на електрически сигнал, пропорционален на твърдостта на изпитвания метал позволява конструирането на електронни уреди на базата на този метод.

Намотката се намира в края на измервателната глава, близо до измерваната повърхност.



Амплитудата на сигнала при падане е означена с А, а при отскачане – с В. **HL = 1000 В/А**

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Мястото на намотката спрямо измерваната повърхност се подбира така, че ударът да се случи малко след като е преминала максималната стойност. Ако ударът е по-рано или по-късно, няма да се получи точно измерване.

Индуцираното напрежение е функция на скоростта на промяна на магнитния поток ( $d\Phi/dt$ ), т.е. на скоростта на движение на тялото. Полученият сигнал е с достатъчна амплитуда (200–300 mV) и входните стъпала на уреда не трябва да са с голяма чувствителност. Проблем е времето, през което се развива процесът – около 1ms.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Измервателят на твърдост по Лийб по правило е преносим уред – работи с батерийно захранване. За неговото изграждане са възможни различни подходи.

Ще бъдат разгледани няколко решения за реализацията на метода като електронен уред, ще се потърсят предимствата и недостатъците на всяко решение.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

1) С използване на два върхови изправителя (детектора) за запомняне на амплитудите на импулсите и схема за измерване – волтметър.

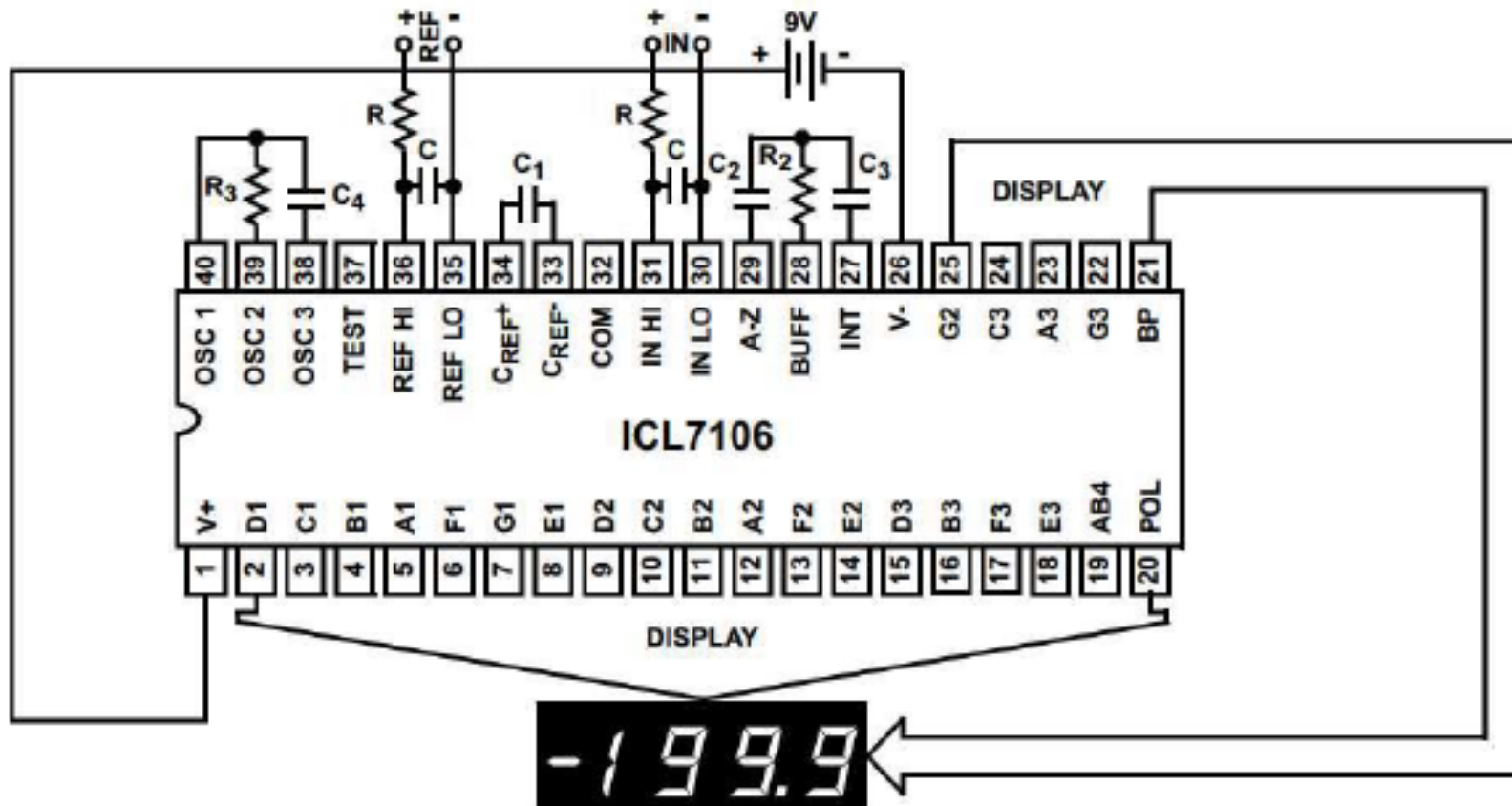
Когато сигналът от намотката се подаде на детекторите, те запомнят двете амплитуди А и В. Тези две напрежения се подават на интегрална схема ICL7106 (7107), която представлява АЦП с двутактно интегриране.

Разликата между ICL7106 и ICL7107 е в типа на индикацията. ICL7106 е за течно-кристални (LCD) индикатори, а 7107 – за светодиодни (LED).

# Измерване на твърдост на метали

Методи за измерване на твърдост на метали

Подробности за схемите - <http://www.intersil.com/>

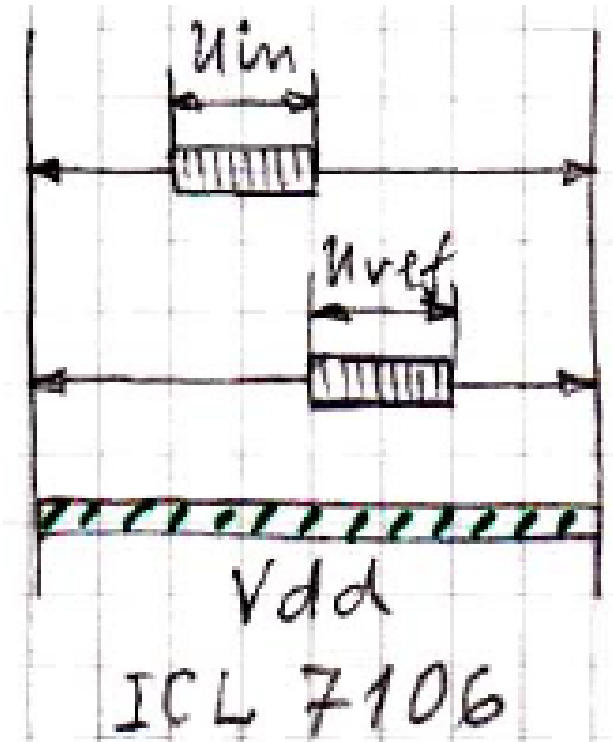




# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

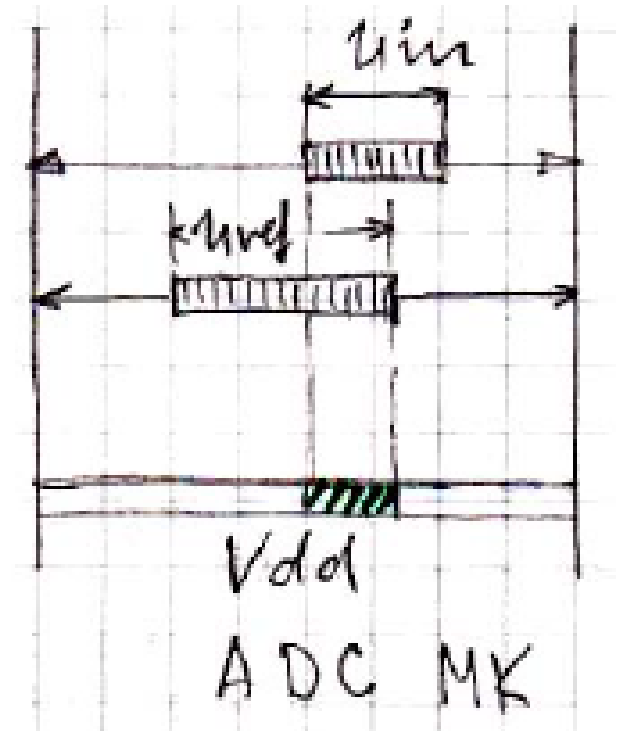
Особеност (и предимство) на схемата ICL7106 е възможността  $U_{in}$  и  $U_{ref}$  да са “плаващи” едно спрямо друго и спрямо захранването на схемата, при условие, че  $U_{in}$  и  $U_{ref}$  не излизат извън захранващите напрежения. Няма значение и поляритетът им на включване.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Обикновено при другите АЦП двете напрежения трябва да имат обща маса и измерване е възможно само когато напреженията се припокриват. При микроконтролерите  $U_{in}$  и  $U_{ref}$  също може да са в границите на захранването  $V_{dd}$ , но може да се измерва вярно само там, където е показано.



# Измерване на твърдост на метали

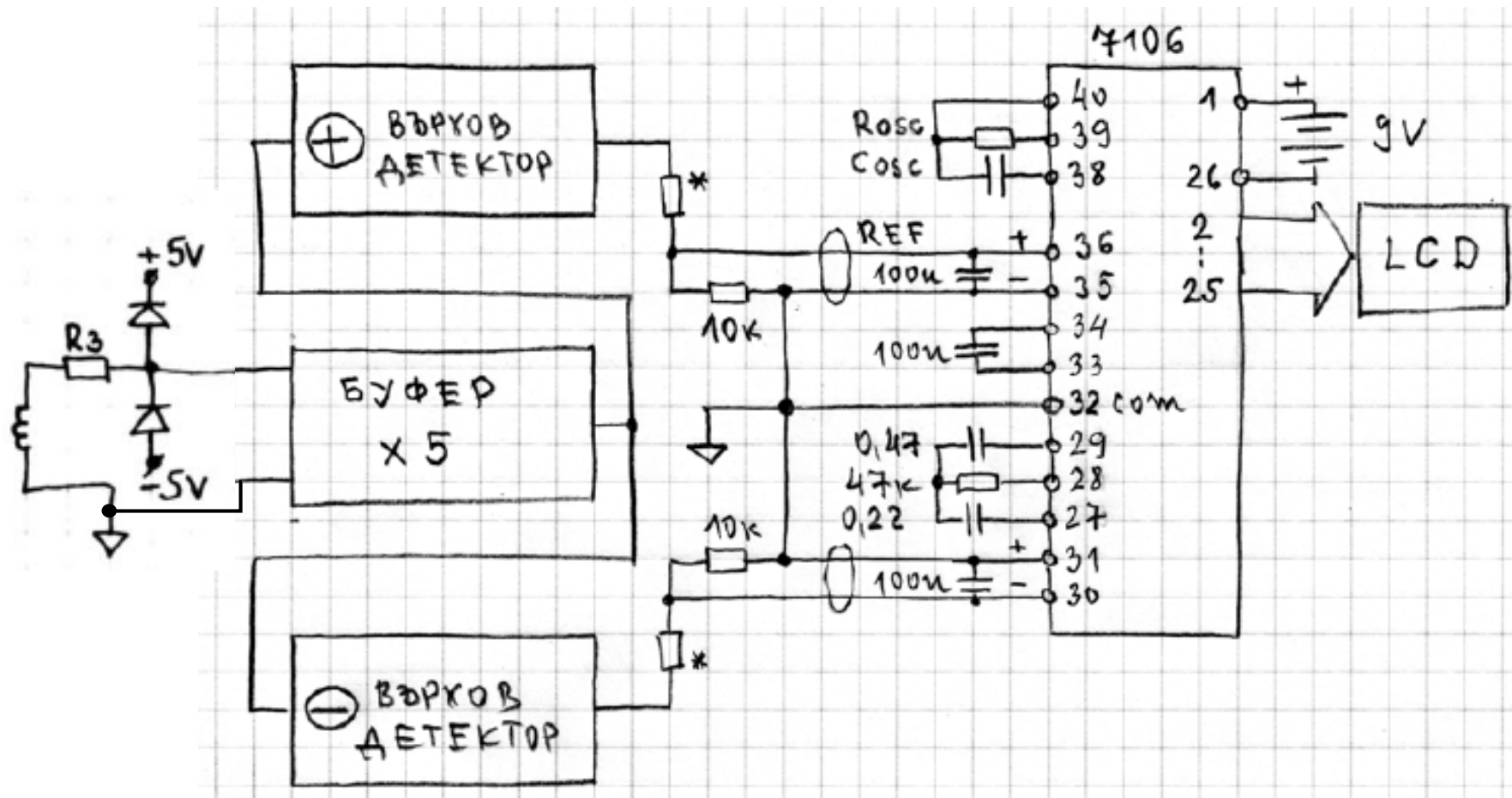
## Методи за измерване на твърдост на метали

Напрежението от единия детектор (В) се подава като входно –  $U_{in}$ , а от другия (А) – като опорно  $U_{ref}$ . В схемата трябва да се извърши операцията деление –  $V/A$ . Показанията на почти всички АЦП се дават от формулата  $N=2^n \cdot (U_{in}/U_{ref})$ , където  $N$  е показанието,  $n$ –разрядността на АЦП. Обикновено  $U_{ref}$  е константа,  $2^n$ -също и така за входното  $U_{in}$  се получава  $U_{in}=K \cdot N$ , но в същност  $N$  е функция на отношението  $U_{in}/U_{ref}$  и в случая  $N$  ще показва отношението  $V/A$ , което се търси. А твърдостта по Лийб е пропорционална на това отношение.

# Измерване на твърдост на метали

Методи за измерване на твърдост на метали

Принципно – блокова схема на електронен уред за измерване на твърдост



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Схемата включва два върхови детектора и волтметър с ICL7106. Освен това на входа има буферен блок за защита от пренапрежение с ограничителен резистор и по един диод към (+) и (-).

В зависимост от качествата на върховите детектори схемата може да работи с или без буферен усилвател. При върхови детектори с малък офсет на входа сигналът от измервателната намотка, който е около 200 - 300 mV, може да се подаде директно. В противен случай се използва буферен усилвател с усилване 5 пъти.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

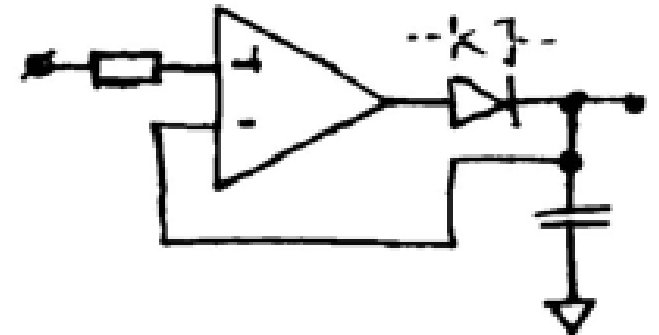
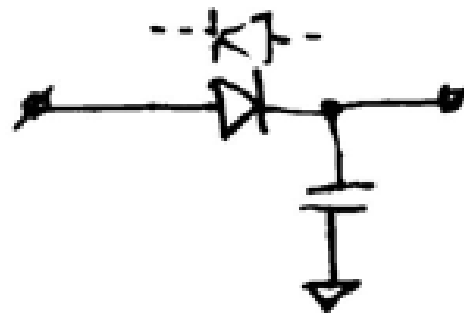
Двете напрежения, които се генерират при падане и отскачане на магнита със съчма са с различна полярност. При използване на ICL7106 няма нужда от инвертор.

Върховият детектор, като принцип на работа, запомня максималната стойност на входния сигнал. Най-простата схема е с диод, през който се зарежда кондензатор. За да няма грешка от пада на напрежение върху диода се използва схема с операционен усилвател.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Показаните схеми са за импулси с положителна полярност. За отрицателни импулси се сменя посоката на диодите – с пунктир. Полученият върху кондензатора сигнал трябва да се подаде по-нататък за измерване. Схемите на върхови детектори трябва да могат да реагират и на най-късите импулси и да помнят върховото напрежение максимално дълго време.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Ако запомнящият кондензатор е с по-малка стойност, той ще се зарежда от кратките импулси, но няма да помни дълго, а ако е голям – ще помни дълго, но няма да реагира на кратките импулси.

Входният ток на ОУ и на следващото стъпало разреждат кондензатора и затова ОУ трябва да се избират с високоомни входове. Това става с използването на буфер – операционен усилвател с полеви транзистори на входа. За да се избегне допълнителната грешка от напрежението на несиметрия на втория ОУ, обратната връзка се взема от изхода му.

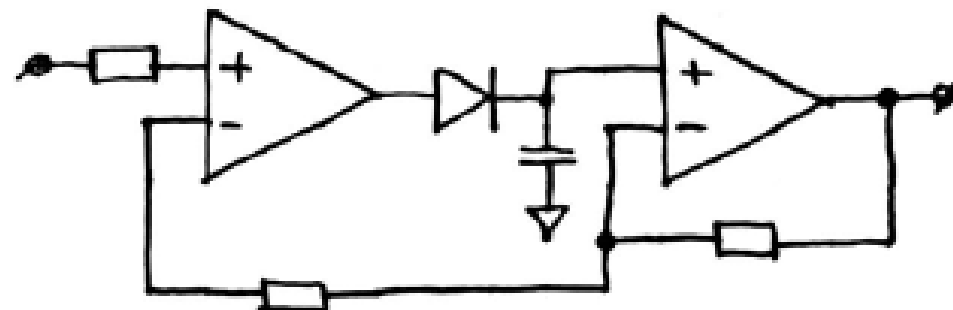
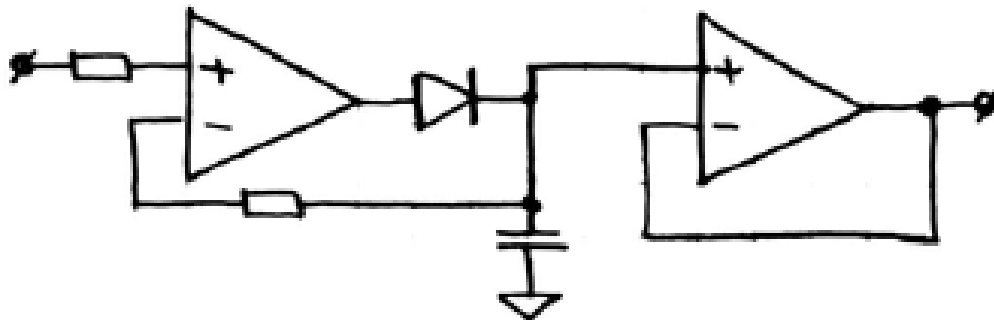


# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Така може да се използва по-евтин операционен усилвател. Проблем при тази схема е устойчивостта – в обратната връзка влиза още едно звено. Вижда се, че факторите, които влияят на качествата на върховия детектор са много, а изискванията – противоречиви.

Качествата на върховия детектор в най-голяма степен зависят от параметрите на ОУ.

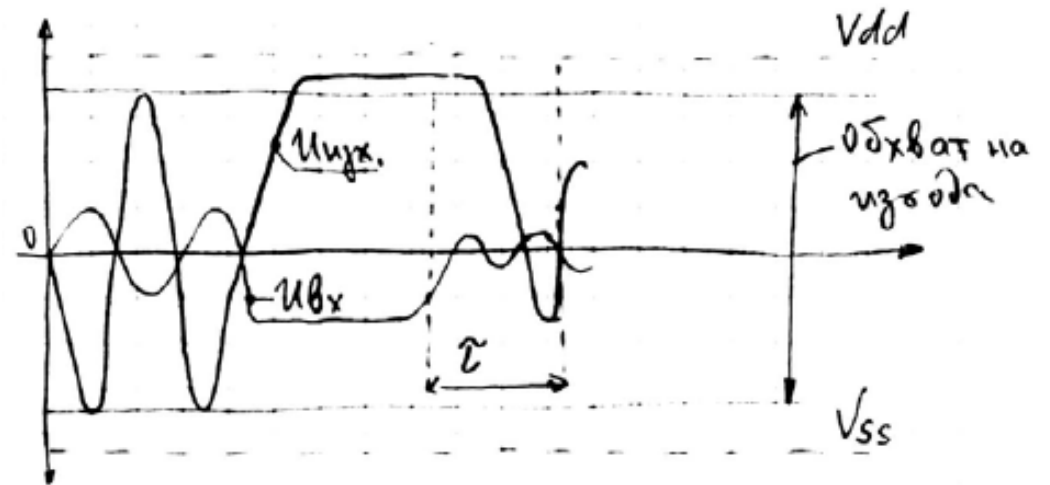


# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Основните параметри са входният ток, честотната лента, скоростта на нарастване на изходния сигнал.

Тези параметри обикновено се отнасят за ОУ, който е в активен режим – когато изходният сигнал е в границите на работния обхват (при отрицателна обратна връзка). Тогава операционният усилвател има добри честотни свойства.



Входно и изходно напрежение на инвертиращ ОУ

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

В обхвата, който е допустим за изхода, ОУ следва входния сигнал (умножен по коефициента на усилване). Когато на входа се подаде такова напрежение, че изходът достига максимума в положителна или отрицателна посока, операционният усилвател влиза в насищане. За да се излезе от това състояние, трябва време -  $t$ . Това време може да е много голямо и да компрометира ОУ, иначе, с добри параметри.

При върховия детектор, когато входното напрежение премине максимума и започне да спада, диодът се запушва, обратната връзка прекъсва и ОУ излиза от активен режим.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

С подходящо проектирана обратна връзка операционният усилвател трябва винаги да бъде в активен режим. Това не може да стане без усложняване на схемата. Добавя се диод между изхода и входа на първия ОУ. Докато входното напрежение нараства обратната връзка се затваря през втория ОУ. При достигане на максимума диодът, през който се зарежда кондензаторът се запушва, но се отпушва другият диод.

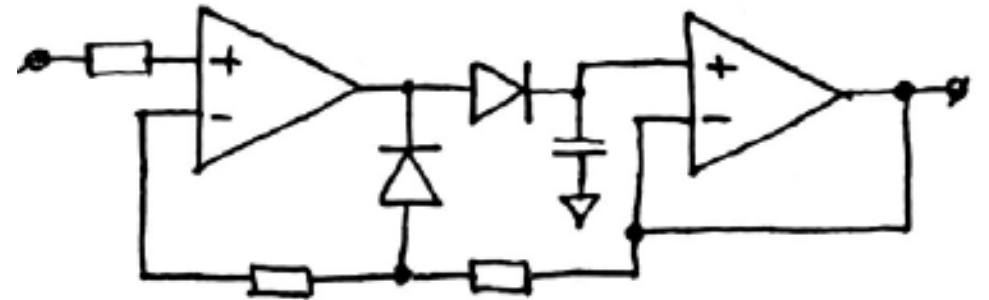
Така операционният усилвател винаги е с обратна връзка и е в активен режим.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Остава да се компенсират обратният ток на диода, който също разрежда кондензатора.

Импулсните диоди, които имат голямо бързодействие, имат голям обратен ток. Всъщност той е само няколко nA, но се оказва голям в сравнение с входния ток на операционните усилватели (с полеви транзистори), който е няколко pA.



# Измерване на твърдост на метали

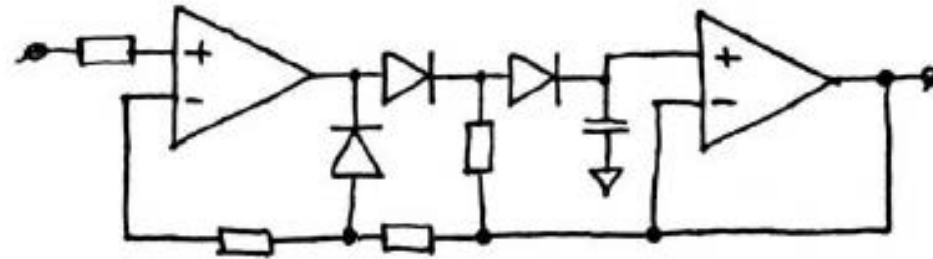
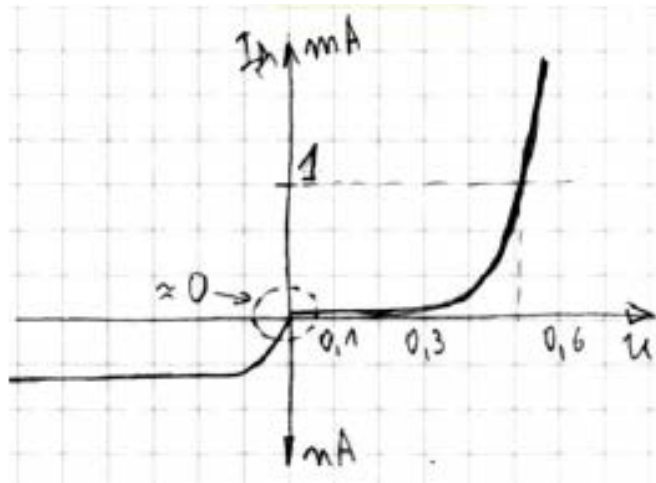
## Методи за измерване на твърдост на метали

За да се осигури по-голямо бързодействие на върховия детектор (широка честотна лента), се използва много малък кондензатор и дори тези няколко нА ще го разреждат бързо, а показанието би трябвало да се задържа няколко минути. Необходимо е да се осигури на диода режим, при който през него не тече ток – напрежението върху него да е около нулата.

Схемата трябва да се съобрази и с последователността на измерване – преди опита върховият детектор трябва да се постави в начално състояние – кондензаторът да се разрежи.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали



Запомнящият кондензатор се зарежда през два диода. Между двата диода през резистор се подава напрежението от изхода. Същото по стойност напрежение както върху запомнящия кондензатор и катода на втория диод – операционният усилвател работи като повторител.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Щом като напрежението между анода и катода на диода е нула, то и токът през него е нула, както се вижда от характеристиката.

Показаните схеми са на върхови детектори за положителни импулси. За отрицателните е необходимо да се обърне поляритетът на диодите.

След като завърши измерването и непосредствено преди следващото, кондензаторите на върховите детектори трябва да се разредят. Това може да стане или с механични контакти (реле или бутон), или с електронен ключ. Той може да бъде или отделен полеви транзистор или интегрален ключ – CD4016, CD4066.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Електронният ключ е по-модерно решение, но при него също възниква проблемът с тока в отворено състояние (утечка), който ще разрежда запомнящия кондензатор.

При дискретните полеви транзистори токът на утечка е регламентиран и напълно удовлетворява изискванията. При ключовете в интегрално изпълнение, за съжаление, обикновено се дава типова стойност, за входове и изходи в неактивно състояние (tri-state)  $-1\mu\text{A}$ . Това е твърде много.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Вариантът на електронен измервател, с използването на интегрална схема – волтметър ICL7106 е най-прост като изпълнение, не изисква програмно осигуряване, лесно се настройва и обслужва.

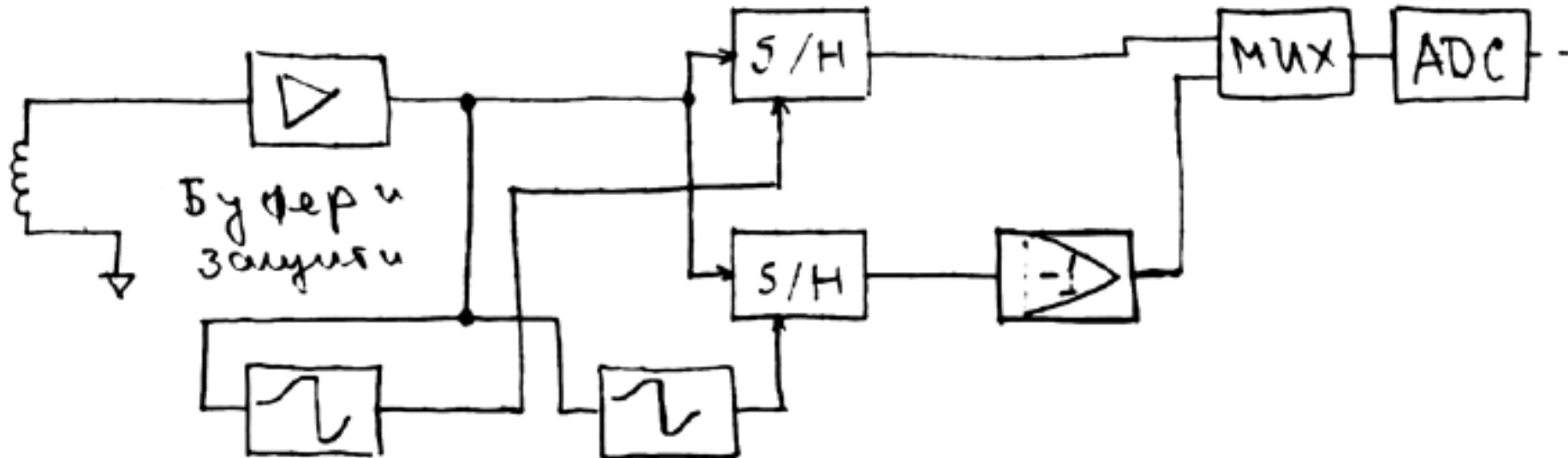
В същото време не може да сменя мерната скала след като е завършило измерването, времето за запазване на последния резултат е ограничено, не може да се направи усредняване, статистика и др.

Следващите варианти, при които се използват микроконтролери, цифрова обработка, интерфейси и таблици на съответствието между различните скали дават по-богати възможности на потребителите.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

2) С използване на две схеми “Следене-запомняне”, които да минат в режим на запомняне при прехода падане-отскок. Едната схема трябва да се задейства малко преди, а другата малко след прехода. След това с АЦП (стандартно бързодействие) се измерват напреженията.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

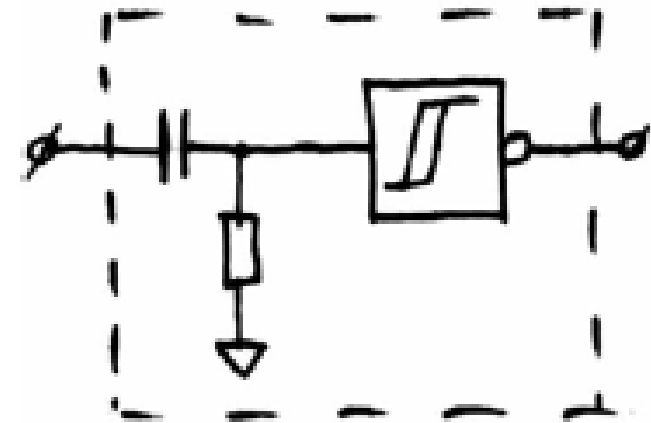
Тъй като двата пика са с различна полярност, а обикновено АЦП е еднополярен, се налага инвертиране на единия сигнал. Това може да стане преди или след схемата “Следене–запомняне”. Прави се това, което е по-просто – ако е преди S/H, към инвертора има изисквания за бързодействие, ако е след – то схемата S/H трябва да е двуполярна.

За да се формират сигналите към схемите следене-запомняне се има в предвид, че индуцираното напрежение в намотката при падане, практически, всеки път е едно и също – условията са едни и същи.

# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

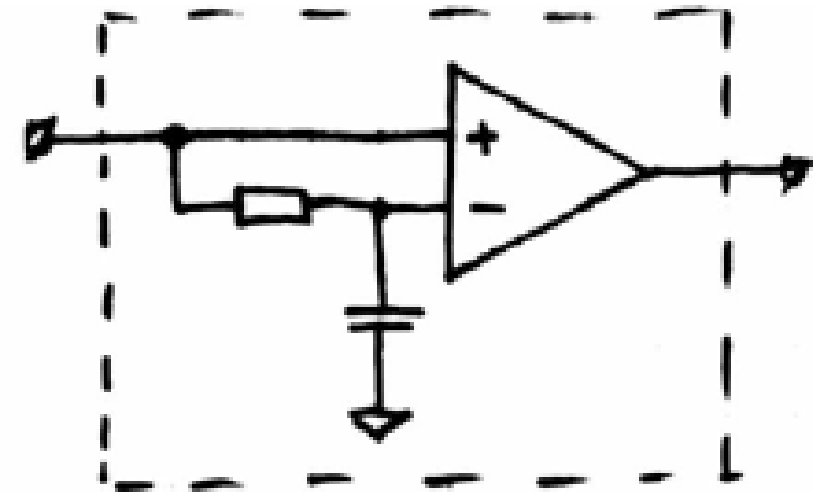
Формата на това напрежение позволява, с диференциране, точно да се определи моментът на максимум – производната е нула. Това може да стане с диференцираща RC група и тригер на Шмит.



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

Другият формирова̀тел трябва да “открие” резкия преход в сигнала. Това също може да стане с RC група и компаратор. Друго, по-просто решение е със закъснение (чакащ мултивибратор) от сигнала към първия S/H, защото формата на индуцирания сигнал не се променя значително – променя се амплитудата  $V$ .



# Измерване на твърдост на метали

## Методи за измерване на твърдост на метали

3) С използването на бързи, високо-разрядни АЦП (12 разряда и време за преобразуване  $< 1\mu s$ ) и контролер, който търси максимумите в двата импулса и изчислява отношението. Това е модерен, но скъп вариант (програмното осигуряване), а този тип уреди не се произвеждат в големи количества като битовите.

