

Materialeprøvning

Kontrol af metalliske materialer

Kontrolmetoder

Stålværkerne, støberierne, metalværkerne, plastfabrikanterne og de teknologiske institutter fører løbende kontrol med materialerne, der i færdig tilstand skal være i overensstemmelse med de gældende normer.

Efterkontrol udføres i Danmark efter Dansk 54 Standard og de internationale regler for materialeprøvning. Prøvningen foregår hovedsagelig ved mekaniske prøver i specielle prøvemaskiner. De vigtigste er:

- Trækprøven
- Hårdhedsprøven
- Slagsejhedsprøven
- Erichsen-prøven
- Swift-prøven
- Udmattelsesprøven
- Ikke destruktive prøver

Trækprøven

Trækstyrke

Ved trækstyrke forstås den største trækspænding, materialet kan tåle inden brud. Trækbrudstyrken kaldes også for den maksimale trækspænding og betegnes som R_{mt} .

Trækstyrken måles i N/mm^2 som forholdet mellem den maksimale trækraft, der betegnes F_{mt} , og prøvestangens tværsnitsareal, der betegnes S_0 .

$$R_{mt} = \frac{F_{mt}}{S_0} \text{ i } N/mm^2$$

Ved flydespænding forstås den største trækspænding, materialet kan tåle, inden der opstår en blivende formændring.

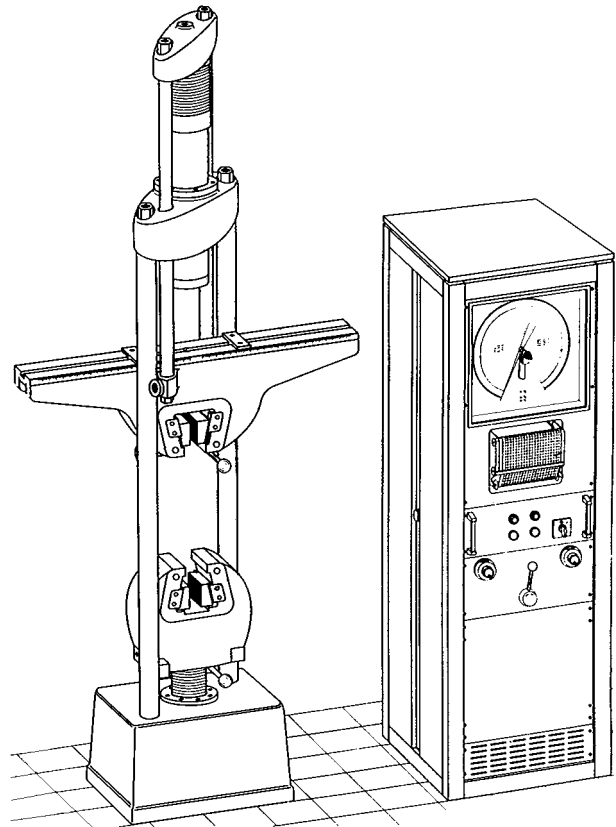
Flydespændingen betegnes R_e og måles i N/mm^2 .

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ i } N/mm^2$$

Trækprøvning er en metode til måling af metallets styrkeegenskaber og anvendes til kontrol af tilsatsmaterialer og grundmaterialer.

Trækprøvning udføres i en trækprøvemaskine, der som regel er hydraulisk drevet.

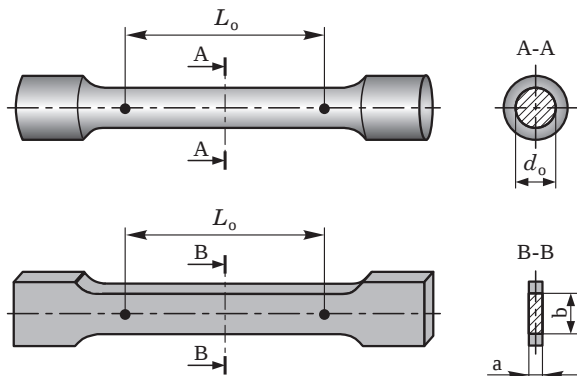
Prøvestangens tværsnit er normalt cirkulært eller rektangulært, men kan dog i særlige tilfælde have en anden form.



sv021-01.tif

Trækprøvemaskine

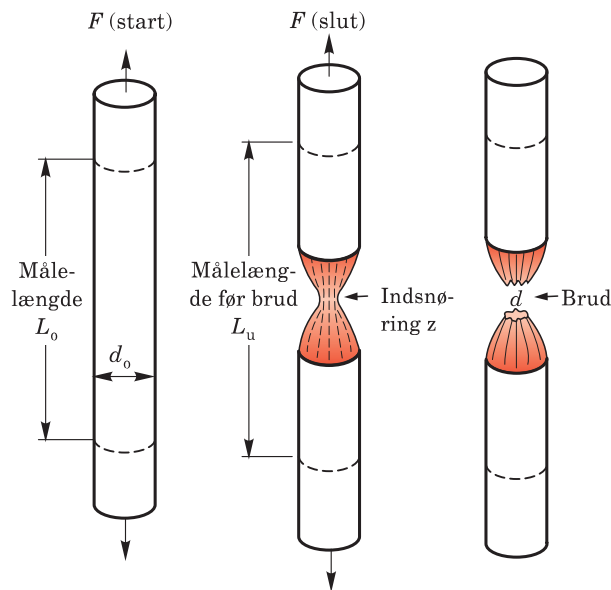
Standardiserede prøvestænger fremstilles både som runde og firkantede stænger.



ma167c14.cdr

Trækprøvestænger kan være rektangulære eller runde

I det efterfølgende vises en skitse af en blød stål-stang, der bliver trukket over. Målelængden på stangen er normalt standardiseret til 50 eller 100 mm.



ma167-01.cdr

Blød stål-stang, der bliver trukket over

- d_0 = Prøvestangens diameter i mm før brud
- d = Prøvestangens diameter i mm efter brud
- L_0 = Målelængde i mm
- ΔL = Længdeudvidelse i mm = $L_u - L_0$
- $\frac{L_u - L_0}{L_0}$ = Enhedsforlængelsen (ubenævnt)
- z = Indsnøring (kontraktion) i %

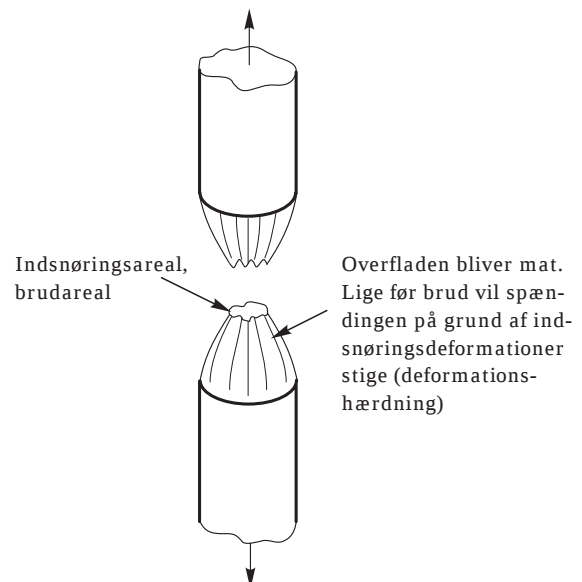
Indsnøring

Lige før prøvestangen under trækforsøget når brudgrænsen, vil der fremkomme en indsnøring på stangens svageste sted. Denne indsnøring fortæller noget om materialets brudsejhed. Jo større indsnøring, jo større brudsejhed. F.eks har hærdet stål ingen indsnøring, dvs. at brudsejheden er meget lille.

Indsnøringen måles som en tværsnitsarealfor-mindskelse i procent.

$$z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, \text{ hvor}$$

- z = Indsnøringen eller kontraktionen
- S_0 = Trækstangens oprindelige tværsnitsareal
- S_u = Indsnøringsarealet



ma167-07.cdr

Indsnøring på stangen

Eksempel:

$$\begin{aligned} d_o &= 5 \text{ mm} \\ d &= 4,1 \text{ mm} \\ S_o &= \\ S &= \\ F_e &= 370 \text{ N} \\ F_{mt} &= 580 \text{ N} \\ L_o &= 50 \text{ mm} \\ L_u &= 62 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$R_e = \left(\frac{F_e}{S_o} \right)$$

$$R_{mt} = \left(\frac{F_{mt}}{S_o} \right)$$

$$z = \left(\frac{S_o - S_u}{S_o} \right) \cdot 100$$

$$A = \left(\frac{L_u - L_o}{L_o} \right) \cdot 100$$

$$R_e = \frac{370}{\pi \cdot 2,5^2} = \text{N/mm}^2$$

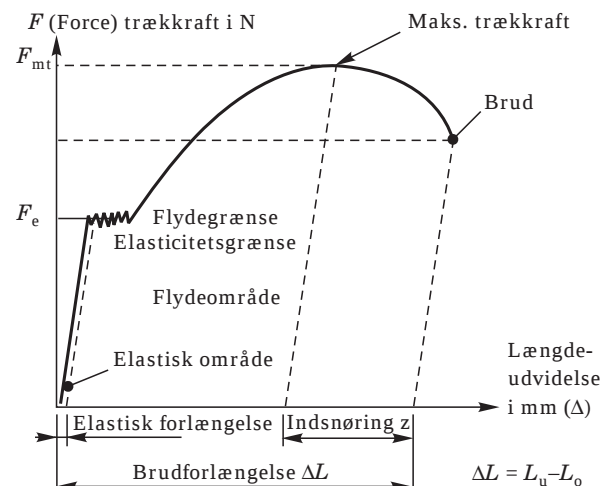
$$R_{mt} = \frac{580}{\pi \cdot 2,5^2} = \text{N/mm}^2$$

$$z = \frac{(\pi \cdot 2,5^2) - (\pi \cdot 2,05^2)}{\pi \cdot 2,5^2} \cdot 100 = 2,76\%$$

$$A = \frac{62 - 50}{50} \cdot 100 = 24\%$$

Trækdiagrammet

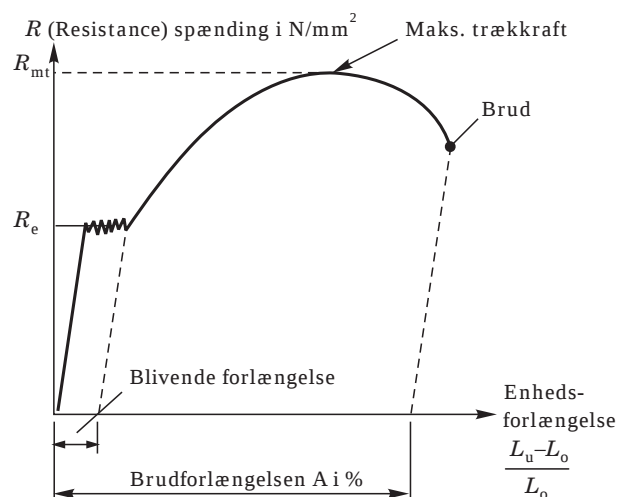
Oscillografen på trækprøvemaskinen udskriver samtidig med trækprøven en arbejdslinie (kurve) i et diagram som følgende:



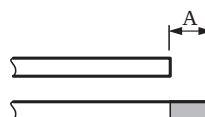
ma167-02.cdr

*Trækdiagrammet over stål 37 ≈ Fe 360 B
(eksempel)*

Ovenstående diagram kan også tegnes som et enhedsdiagram.



ma167-05.cdr



ma167-15.cdr

- A = Brudforlængelse i %
 A_5 = Brudforlængelse i % ved en trækprøvestang med en diameter (d_0) på 20 mm og en målelængde på 100 mm (5:1)
 A_{10} = Samme med en diameter på 10 mm og en målelængde på 100 mm (10:1)

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$$

Elasticitetsgrænse

Indtil en vis grænse vil materialet praktisk talt være elastisk og vil ved aflastning trække sig sammen igen til sin oprindelige længde. Elasticitetsgrænsen er den højeste spænding, hvorved man undgår blivende forlængelse.

Proportionalitetsgrænse (R_p)

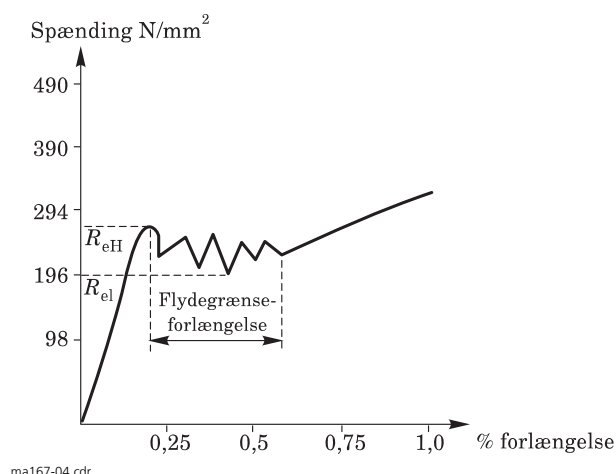
Indtil en vis spænding vil forlængelsen være proportional med belastningen, dvs. at for hver N belastningen forøges, vil prøvestykket forlænges med samme længde. Proportionalitetsgrænsen er den højeste spænding, hvor dette er tilfældet.

Flydegrænsen

Når materialet belastes ud over proportionalitetsgrænsen, vil forlængelsen blive større og større for hver N, belastningen forøges. Hvis der pludselig sker en stærk længdeændring (materialet flyder), siges flydegrænsen at være nået. Den hertil hørende spænding kaldes flydespændingen, hvor der tales om den øvre (R_{eH}) og den nedre flydespænding (R_{el}).

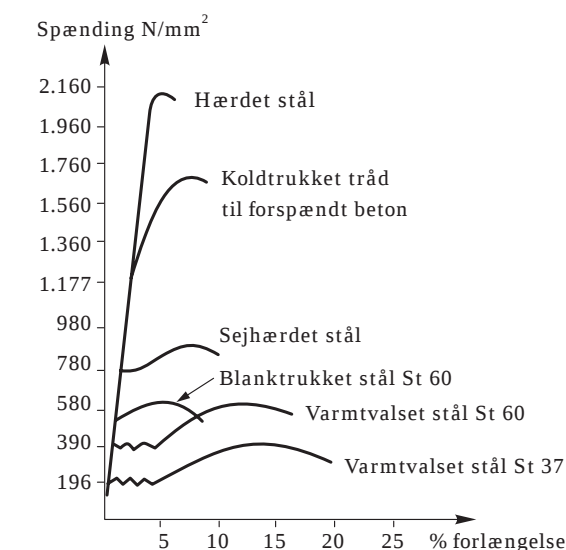
Flydegrænsen kaldes både svigtgrænsen og skridgrænsen.

Det er den øverste flydespænding, der i de danske normer for stål- og betonkonstruktioner er grundlag for styrkeberegningen.



ma167-04.cdr

Udsnit af arbejdslinien for et varmtvalset stål 37, der har udpræget flydegrænse



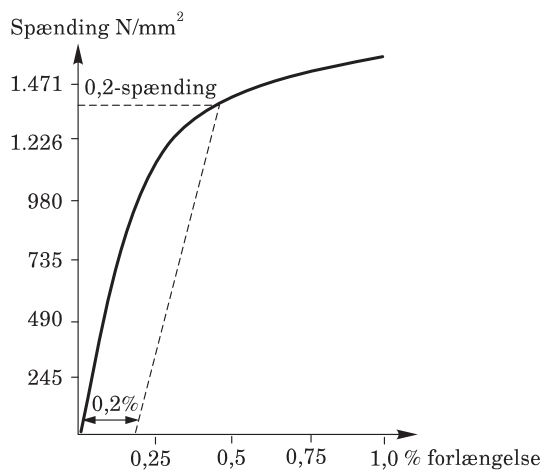
ma167-03.cdr

Arbejdslinier for forskellige stål kvaliteter. Det ses, at stigende brudstyrke giver faldende brudforlængelse

Elasticitetsgrænsen, proportionalitetsgrænsen og flydegrænsen er stort set sammenfaldende.

0,2-spændingen ($R_{0,2}$)

Koldbearbejdede stålprodukter, hærdet stål, aluminium, kobber og messing har ikke nogen flydegrænse. Ved disse anvendes i stedet for flydespændingen 0,2-spændingen, idet der ved 0,2-spændingen er sket en så lille plastisk deformation (0,2%), at man i praksis kan se bort fra den. 0,2-spændingen er ligesom flydegrænsen en vigtig materialekonstant, der danner grundlag for styrkeberegning af konstruktioner.



ma167-06.cdr

Udsnit af arbejdslinien for et koldtrykkestål, ingen udpræget flydespænding, derfor benyttes 0,2-spændingen

Elasticitetsmodul (E) N/mm^2

Alle metaller er mere eller mindre elastiske, dvs. at de indtil en vis belastning vil fjedre tilbage til den oprindelige form.

Elasticitetsmodulet (E-modulet) defineres som arbejdsliniens hældning i trækdiagrammet. E-modulet angiver et materiales stivhed. Jo større elasticitetsmodul, jo stivere materiale.

Ved trækforsøg har man fundet ud af, at der er en naturbestemt sammenhæng mellem metallerne trækstyrke, elasticitet og forlængelse. Denne sammenhæng udtrykkes i Hooke's lov, der siger:

$$R_e = E \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

R_e = Flydespændingen i N/mm^2
 E = Elasticitetsmodulet

$$\frac{L_u - L_0}{L_0} = \text{Tøjningen}$$

OBS! Hooke's lov gælder kun inden for elasticitetsgrænsen.

Forskellige materials E-modul (ca.)

Stål	210.000 N/mm^2
Støbejern	125.000 N/mm^2 (tilnærmet)
Aluminium	65.000 N/mm^2
Kobber	125.000 N/mm^2
Bly	16.000 N/mm^2
Plast	3.500-7.000 N/mm^2
Keramik (Al_2O_3)	400.000 N/mm^2

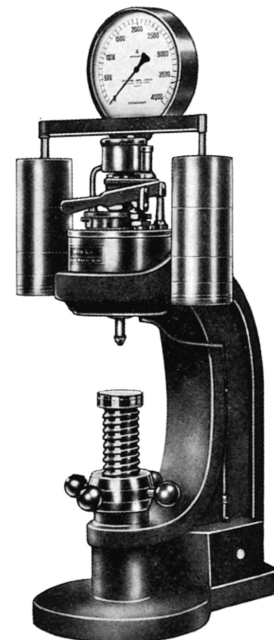
Hårdhedsprøven

Der er udviklet en mængde målemetoder for at måle en eller anden størrelse, hvoraf de vigtigste er:

- Brinell-hårdhedsmetoden
- Rockwell-hårdhedsmetoden
- Vickers-hårdhedsmetoden

Brinell-hårdheden

Brinell-hårdhedsmetoden er den ældste, men alligevel en af de mest anvendte hårdhedsmålinger undtagen til hærdede emner.

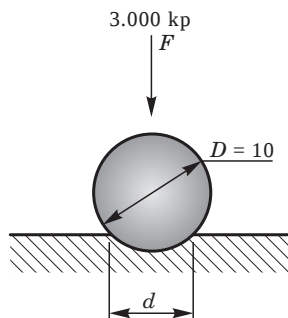


ma323-13.jpg

Brinell-apparat

Den udføres ved at trykke en hærdet stålkugle ned i materialet med en bestemt kraft, og Brinell-hårdheden HB bestemmes da som forholdet

mellem kraften F og indtryksarealet A , der har form som en kuglekalot.



ma149-02.cdr

Brinell-hårdhedprøve

$$\text{Formel} = \text{HB} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Eksempel:

$$F = 3.000 \text{ kp} \approx 29.460 \text{ N}$$

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$d = 5,3 \text{ mm}$$

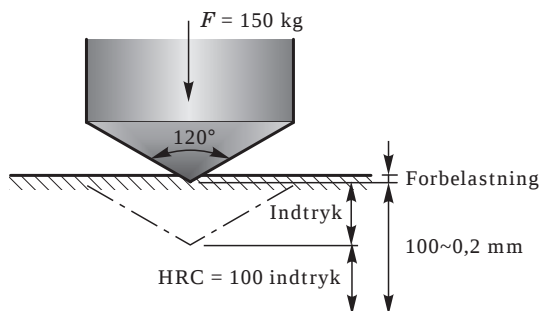
$$\text{HB} = \frac{2 \cdot 3.000}{\pi \cdot 10 \cdot (10 - \sqrt{10^2 - 5,3^2})} = 126 \text{ kp}^2$$

Rockwell-hårdheden (Rockwell C)

Rockwell-hårdhedsmetoden er fremkommet i Amerika og har vundet stor udbredelse, navnlig til undersøgelse af hærdede genstande på grund af den hurtige arbejdsmåde.

Måling HRC

Når man skal måle hårdheden HRC i hærdet stål og hårde metaller, anvendes som indtrykslegeme en diamantkegle med topvinkel 120° og afrundet spids med en radius på 0,2 mm. I modsætning til Brinell- og Vickers-prøverne bestemmes hårdheden her som en funktion af indtryksdybden.



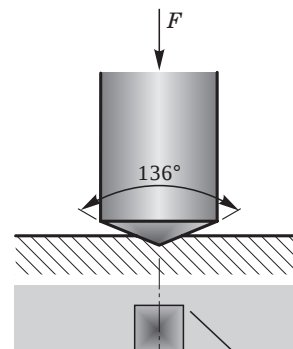
ma149-03.cdr

Måling af Rockwell-hårdhed

Vickers-hårdheden

Vickers-metoden ligner i princippet Brinell-metoden. Prøvelegemet er dog her en 4-sidet diamantpyramide med en fladevinkel på 136° , som trykkes ned i emnet med en kraft af en størrelse, som kan vælges blandt følgende normalbelastninger:

$$F = 5 - 10 - 20 - 50 - 100 \text{ kp}$$



ma149-01.cdr

Vickers-hårdhedsprøve

Anvendelse

Hårdhedsmåling efter Vickers-metoden er anvendelig til praktisk taget alle metalliske materialer, men den har specielt fundet anvendelse i laboratorier og til undersøgelse af ganske tynde emner og emner med et tyndt, hårdt overfladelag. Det er den mest universelle hårdhedsprøvning, der eksisterer. Til meget uensartede materialer som støbejern er metoden ikke velegnet.

Vickers-hårdheden og Brinell-hårdheden er overensstemmende op til 3.000 N/mm^2 . Ved større hårdhed vil Brinell-kuglens deformation betyde, at Vickers-tallet bliver større end Brinell-tallet for samme materiale.

Til hårdhedsmåling i meget tynde emner som folier eller til undersøgelse af værktøjer helt ude på æggen samt til bestemmelse af hårdheden i enkelte krystaller er der fremstillet Vickers-apparater til små belastninger, f.eks fra 300 til 1.000 g, mikrohårdhedstallene er i reglen noget højere end Vickers-tallet.

Vickers-prøven er standardiseret i DS 10411.

Sammenligningstabel mellem de forskellige
hårdhedsenheder i forhold til metallernes brud-
styrke

Brud- styrke N/mm ²	Vickers	Brinell	Rock- well B	Rock- well C
255	80	76,0		
270	85	80,7	41,0	
285	90	85,5	48,0	
305	95	90,2	52,0	
320	100	95,0	56,2	
335	105	99,8	62,3	
350	110	105		
370	115	109		
385	120	114	66,7	
400	125	119		
415	130	124	71,2	
430	135	128		
450	140	133	75,0	
465	145	138		
480	150	143	78,7	
495	155	147	81,7	
510	160	152		
530	165	156		
545	170	162	85,0	
560	175	166		
575	180	171	87,1	
595	185	176		
610	190	181	89,5	
625	195	185		
640	200	190	91,5	
660	205	195	92,5	
675	210	199	93,5	
690	215	204	94,0	
705	220	209	95,0	
720	225	214	96,0	
740	230	219	96,7	
755	235	223		
770	240	228	98,1	20,3
785	245	233		21,3
800	250	238	99,5	22,2
820	255	242		23,1
835	260	247	(101)	24,0
850	265	252		24,8
865	270	257	(102)	25,6
880	275	261		26,4

Brud- styrke N/mm ²	Vickers	Brinell	Rock- well B	Rock- well C
900	280	266	(104)	27,1
915	285	271		27,8
930	290	276	(105)	28,5
950	295	280		29,2
965	300	285		29,8
995	310	295		31,0
1.030	320	304		32,2
1.060	330	314		33,3
1.095	340	323		34,4
1.125	350	333		35,5
1.155	360	342		36,6
1.190	370	352		37,7
1.220	380	361		38,8
1.255	390	371		39,8
1.290	400	380		40,8
1.320	410	390		41,8
1.350	420	399		42,7
1.385	430	409		43,6
1.420	440	418		44,5
1.455	450	428		45,3
1.485	460	437		46,1
1.520	470	447		46,9
1.555	480	(456)		47,7
1.595	490	(466)		48,4
1.630	500	(475)		49,1
1.665	510	(485)		49,8
1.700	520	(494)		50,5
1.740	530	(504)		51,1
1.775	540	(513)		51,7
1.810	550	(523)		52,3
1.845	560	(532)		53,0
1.880	570	(542)		53,6
1.920	580	(551)		54,1
1.955	590	(561)		54,7
1.995	600	(570)		55,2
2.030	610	(580)		55,7
2.070	620	(589)		56,3
2.105	630	(599)		56,8
2.145	640	(608)		57,3
2.180	650	(618)		57,8

Slagsejhedsprøven (kærvelslagsprøvning)

Slagsejhedsprøvning er udviklet i USA under 2. verdenskrig som en prøvningsmetode til vurdering af et foreliggende materiales egenskab til at indgå i store helsvejsede konstruktioner.

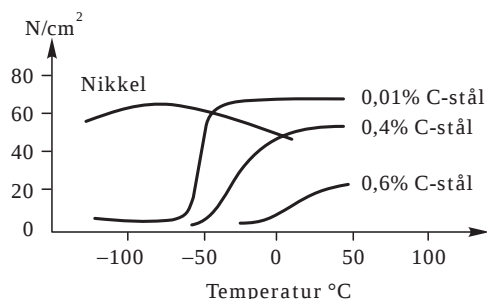
Baggrunden for udviklingsarbejdet var de mange havarier på store helsvejsede konstruktioner. Disse havarier var karakteriseret ved, at konstruktionerne revnede tværs over ved sprøde brud. Ofte var konstruktionerne ubelastede, f.eks. skibe ved kaj og normalt i koldt vejr.

Slagsejhedsprøven udføres ved hjælp af et slagpendul, som man lader falde mod en prøvestang. Den brudenergi, der medgår til at knække prøvestangen, er et mål for materialets sejhed og modstandsevne over for skøre brud, der er farlige ved svejsede konstruktioner og beregnes efter formlen:

$$\frac{E_{\text{pot før}} - E_{\text{pot efter}}}{\text{Emnets areal}} = \text{N/mm}^2$$

Slagsejhedsprøven benævnes forskelligt, alt efter prøvestykkets udformning: Charpy-V prøve, Izod-prøve, ISO-spidsprøve og Schnadt-prøve. Måleenheden er joule/cm².

For stål og visse andre konstruktionsmaterialer har det vist sig, at slagsejheden varierer kraftigt med temperaturen; høje værdier ved høj temperatur og små værdier ved lave temperaturer. Omslagstemperaturen kan være mere eller mindre brat, som vist.

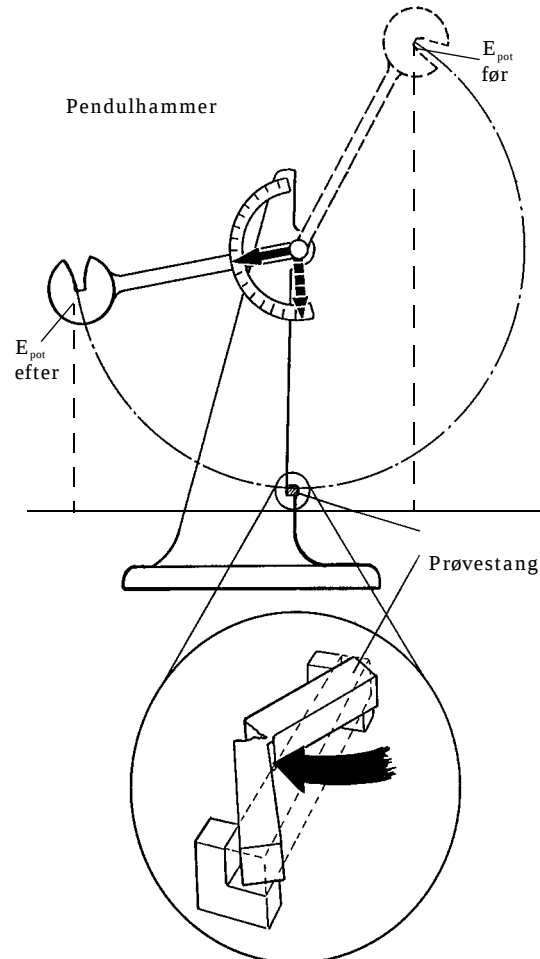


ma167-08.cdr

Kærvelslagstyrkens afhængighed af temperaturen ved forskellige stål samt nikkel

Prøvemaskinen

Maskinen, der bruges til en slagsejhedsprøve, er en pendulhammer ophængt i et kugleleje i et solidt maskinstativ.



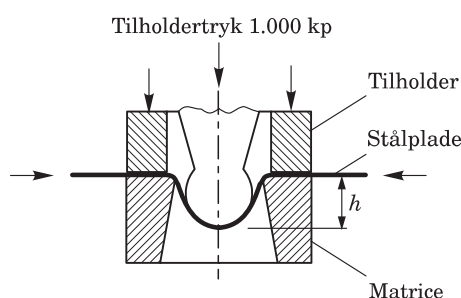
sv021-06.tif

Normalprøve

Erichsen-prøven

Erichsen-prøven er en strækpresningstest, som foregår ved, at man presser et kugleformet stempel ned i en pladerundel, som er anbragt på en matrice med et tilsvarende hul.

Rondellen bliver holdt fast med et tilholdertryk på 1.000 kp. Når der opstår brud på rondellen, måles indtrykningsdybden h i mm. Tallet angiver pladematerialets presbarhed.



ma167-09.cdr

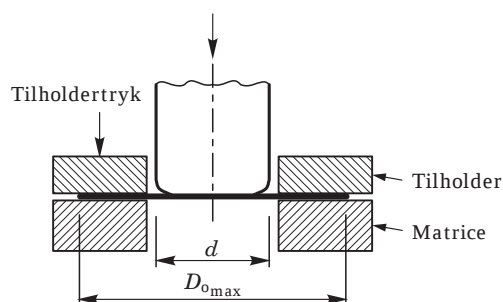
Erichsen-prøven

Swift-prøven

Swift-prøven er en dybtrækningstest, som foregår ved, at man presser et cylindrisk stempel ned mod en specielt udskåret pladerondel og hermed udføres første træk.

Rondeller med stadig stigende diameter dybtrækkes, og på et tidspunkt nås en rondeldiameter, hvor stemplet træder gennem bunden af det endnu ikke færdige emne. Her arbejdes ligeledes med et bestemt tilholdertryk.

Det maksimale trækforhold $\beta_{\max}$ (beta) bestemmes som forholdet mellem den største rondeldiameter $D_{\max}$, der kan trækkes uden brud, og stempeldiameteren d .

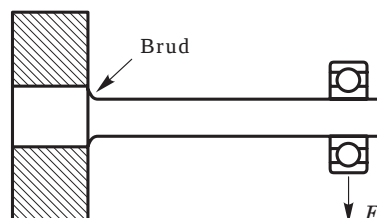


ma167-10

Swift-prøven

Udmattelsesprøven

Denne prøve har stor betydning ved materialer, der skal bruges under en belastning, hvis størrelse eller retning er svingende. Udføres med op til flere millioner periodiske påvirkninger, indtil brud finder sted.

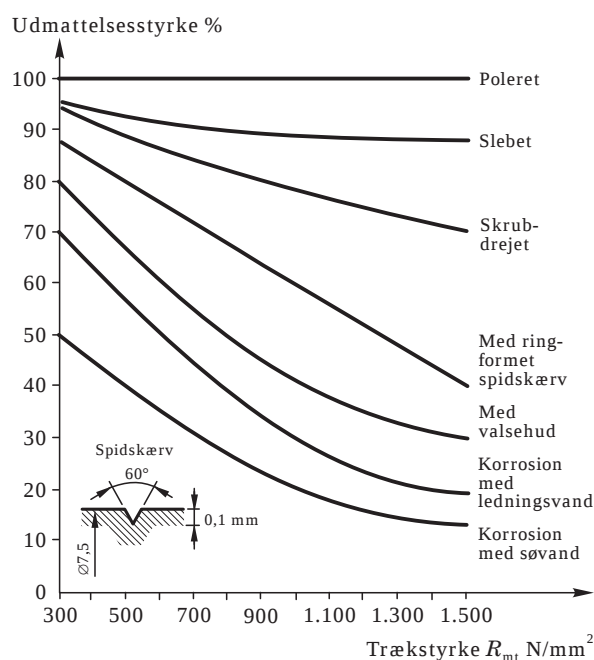


ma167-21.cdr

Roterende bøjning

Udmattelsesstyrken er den spænding, som materialet har, umiddelbart før brud indtræffer.

Udmattelsesstyrke



ma167-11.cdr

Diagram over overfladens indflydelse på konstruktionsstål, hvor den relative udmattelsesstyrke er angivet i forhold til en poleret prøvestangs styrke



ma167-20.jpg

Udmattelsesbrud på en stålaksel

Træthedbrud

Ved gentagne påvirkninger, f.eks. rystelser, hurtige temperaturændringer i omgivelserne, kan materialet efterhånden få indvendige strukturændringer, som bevirker, at dets brudgrænse sænkes langt under det sædvanlige. Materialet siges at være blevet træt, og det brud, der sker som følge heraf, benævnes træthedbrud.

Krybning

Når tråd opspændes mellem to faste punkter, kan spændingen aftage med tiden. Dette kaldes krybning. Krybningen har særlig stor betydning ved store spændinger, f.eks. forspændt tråd til betonkonstruktioner og ved høje temperaturer over 300°C. Ved et materiales krybegrænse forstås den maksimale spænding, man kan anvende, uden at krybningen betyder noget.

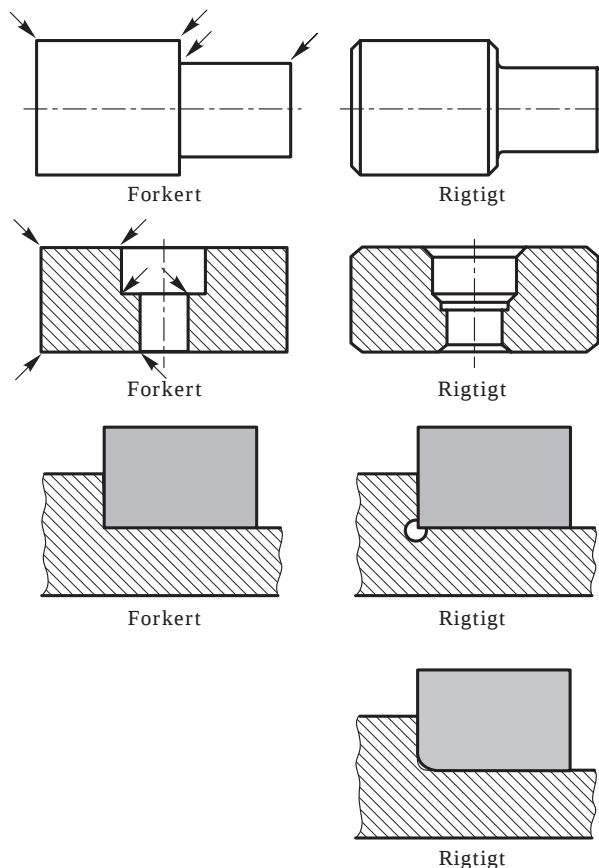
Kærvvirkning

Ca. 30% af samtlige brud på maskindele og værktøj, der er udsat for både svingende og statiske kræfter, skyldes (stadigvæk) kærvvirkninger.

Kærvvirkninger kan defineres som lokale spændingskoncentrationer i form af statiske og dynamiske kræfter, der virker direkte på materialeoverfladens uregelmæssigheder.

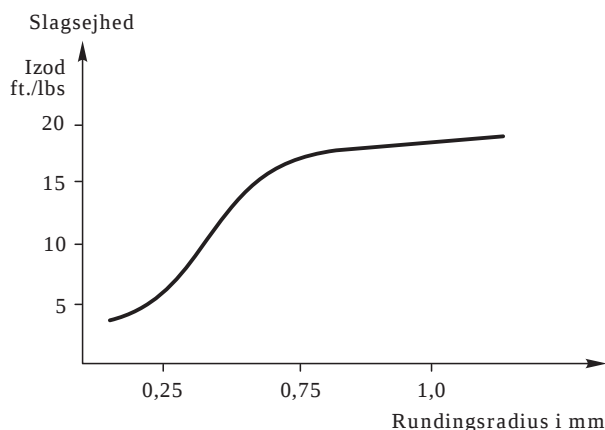
Kærvvirkninger fremkommer ved skarpe indadgående og udadgående hjørner, noter, gevind, drejeriller (hypper), slibespor, hærderovner, indstemplede tal, valsehud, korrosion og inde i materialet slagger, lunkere og gasblærer.

Kærvvirkninger kan reduceres ved rigtigt materialevalg, varmebehandling og konstruktion.



ma167-12.cdr

Eksempler på, hvordan kærvvirkninger kan undgås



ma167-13.cdr

Rundingers indflydelse på kærvvirkning

Gnistprøven

Ved slibning af stål opstår der karakteristiske gnister, som tillader en tilnærmelig tilbagemelding af stålqualiteten. Ved friktionen opstår der høje temperaturer, som oxiderer de fleste elementer.

Stål med lavt C-indhold viser lange, glatte gnister. Med stigende C-indhold opstår der tiltagende spruttende, små stjerner. Andre legeringselementer afgiver typiske farver eller former, f.eks Cr (chrom) gulligrød, W (wolfram) dybrød gnist og Mo (molybdæn) trekantede pile på gnisten.

Denne enkle og billige prøvning kan anvendes ved indgangs- og lagerkontrol og for at undgå forveksling. Stor øvelse og sammenligning med kendte kvaliteter forbedrer nøjagtigheden, især i et halvmørkt rum.

Kemisk sammensætning

Metaller analyseres med en spektralanalyse, som er en kemisk analyse, og beror på, at de forskellige legeringselementer i stål udsender særskilte lysstråler, når de påvirkes i en elektrisk lysbue.

Lyset udskilles i de enkelte farver, hvis intensitet måles og omregnes til legeringselementets procentandel.

Ikke destruktive prøver

Disse prøver omfatter:

- Gennemlysningsprøver
- Ultralydprøver
- Magnetpulverprøven
- Kapillarprøven

Gennemlysningsprøver

Denne prøve udføres med røntgenstråler, som man sender mod prøvematerialet. Strålerne absorberes i materialet. Jo tykkere materialet er, desto vanskeligere har strålerne ved at trænge igennem. Under prøvematerialet lægges en fotografisk film.

Findes der hulrum, slagge og lignende, kan strålerne lettere slippe igennem, og herved øges sværtningen på filmen, der så afslører, hvor materialefejlen ligger.

Ved gennemlysning af store godstykker anvendes strålingskilder fra radioaktive isotoper af f.eks kobolt og irridium.

Prøven anvendes især til kontrol af svejsesømme, men kan også anvendes til kontrol af støbegods.

Ultralydprøver

Denne prøve udføres ved hjælp af højfrekvente lydbølger, som ikke kan opfanges af det menneskelige øre.

Når disse bølger sendes ind i et materiale, f.eks en stålstang, vil eventuelle revner i stålstangen ændre eller reflektere lydsignalerne, og ved hjælp af fine måleinstrumenter kan man således påvise en eller flere revners beliggenhed.

Magnetpulverprøven

Denne prøve kan kun anvendes til magnetiske metaller. Man magnetiserer emnematerialet og tilfører overfladen et magnetpulver, f.eks jernspåner opslæmmet i olie. De små jernspåner, der tiltrækkes af emnets nord- og sydpol, sætter sig fast på overfladens revner, hvorved disse bliver synlige.



sv187-18.jpg

Magnetpulverprøvning

Metoden anvendes til kontrol af hærdede emner og maskindele, der udsættes for svingende belastning.

Magnetpulverprøvning kan påvise overfladefejl som revner, bindingsfejl og laminering.

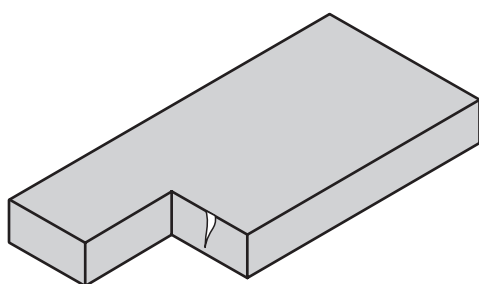
Kapillarprøven

En farvet kapillærveske, kaldet penetrant, påsprøjtes metaloverfladen af det rengjorte emne. Overflødig indtrængningsveske fjernes forsigtigt fra emnets overflade. Der påsprøjtes herefter et fremkaldemiddel, som kan være et hvidt kridtpulver, der er opslæmmet i sprit. Når spritten er fordampet, vil det fine, porøse kridttag suge kapillærvesken op af revnerne og afsløre disse.

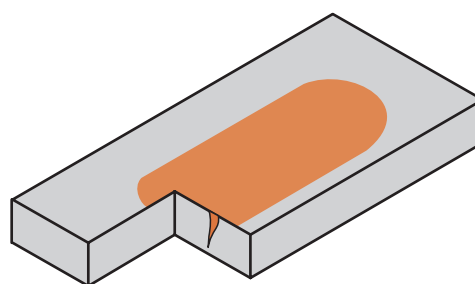
Metoden er relativ hurtig, og man kan påvise selv meget fine revner.

Undersøgelse med kapillærveske er også en ikke destruktiv prøvningsmetode, der kan finde overflade fejl i ikke porøse materialer som stål, støbegods, plast, keramik og lignende. De fejl, der kan registreres ved hjælp af metoden, er porøsiteter, revner, spalter og utætheder.

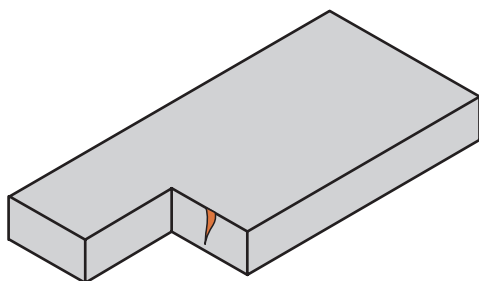
Når du bruger kapillærvesker, skal du betragte emnet hele tiden under fremkaldelsen, ellers risikerer du, at store dele af overfladen på emnet bliver markeret rød, fordi den røde væske, der suges op af eventuelle fejl, løber ud over større arealer.



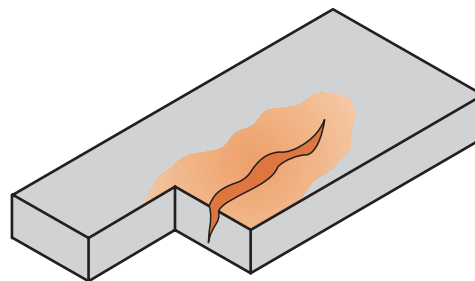
Revnen er ikke synlig på overfladen



Kapillærveske trænger ind i eventuelle revner og porøsiteter



Hverken revne eller kapillærveske er synlig på overfladen



Revnen er »synlig«. Fremkalderen har suget væsken ud og dannet en bred indikation oven på revnen

sv187-06.cdr

Princip i kapillærveskeundersøgelse

