

Rolling of ARALL Laminates

(an alternative method for post-stretching ARALL laminates)

July 1988

D. Chen / F.E.H.M. Smulders / L.B. Vogelesang

Report LR-560

Rolling of ARALL Laminates

(an alternative method for post-stretching ARALL laminates)

July 1988

D. Chen/F.E.H.M. Smulders/L.B. Vogelesang

1. Introduction

It may be a common knowledge by now that the presence of the fibres (aramid or S-glass fibres) in ARALL Laminates significantly enhances the mechanical properties of the laminate, especially in the sense of the fatigue properties. As a result of the fibre bridging mechanism, the fatigue growth rates of ARALL Laminates can be significantly reduced when the fibres remain intact during the fatigue process. Unfortunately, fibre failure can occur when as-cured ARALL Laminates (with aramid fibres) is fatigued under $R=0$ C.A. load conditions. This problem can be overcome by post-stretching the material to reverse the internal thermal residual stress system. The fibres are then set in tension and the aluminum layers in compression. As a result, ARALL laminates gain better fatigue properties and fibre failure does not occur. This post-stretching process has been standardized for some versions of ARALL laminates (ARALL 1).

An alternative process has been developed in the laboratory of the University of Delft. It is found that the reversion of the thermal residual stress system in ARALL laminates can easily be achieved by rolling the material to a permanent setting (for instance 0.4%). The fatigue properties of the material are as superior as the post-stretched version and some of the mechanical properties show also significant improvement without losing any of the advantages of the material.

The main advantage of this process is that conventional rolling equipment can be used which means lower costs and higher productivity for the materials manufacturer. It is also important that this process may be used to treat wide panels which are essential for the application of the ARALL laminates as an aircraft fuselage skin material.

This rolling process is discussed briefly in this report. Some test results are also presented.

* Patent is applied for this rolling process under NL 8703165
"Manufacturing prestressed ARALL by rolling".

2. The rolling process

A rolling-machine as shown in fig.1 is used for this research. The maximum width of the specimen which can be rolled in this machine is ca. 120mm. The diameter of the rollers is ca. 115mm. The distance between the rollers can be adjusted within an accuracy of ca. 0.1mm. The speed of the rollers is constant. And all the specimen are rolled at room temperature.

The permanent elongation of the specimen is measured by comparing the lengths of the specimen before and after rolling. A vernier with an accuracy of 0.01mm is used for the measurements. The rollers are adjusted empirically to achieve the desired permanent setting of the specimens after rolling.

It has been found very important that the fibres of the specimen must be strictly parallel to the rolling direction of the rollers to avoid warping of the specimen. However, rolling tests with standardized 3/2 lay-up ARALL specimens showed very limited warping.

3. Some mechanical properties of rolled ARALL laminates

a. C.A. Fatigue tests with $R=0$

ARALL 2 (2/1 lay-up) has been rolled to have a permanent setting of 0.38% in the fibre direction. C.A. fatigue tests have been carried out. Some ARALL 2 (2/1 lay-up) as-cured specimen have also been tested under the same load conditions. The test results are given in fig.2.

It is obvious, that the rolled specimens have much better fatigue properties compared to the as-cured specimens. Fibre failure did not occur. The rolled specimen showed a much longer fatigue life even under the extremely severe fatigue load condition ($R=0$, $S=0-150$ MPa).

b. Bell-peel tests

A very important property of any structural composite material is the so-called "peel-strength". The Bell-peel tests are often conducted to compare peel-strength of different materials. A sketch of the test method is given in fig.3. A detailed description of the test method applied to ARALL laminates can be found in Dr.M.Verbruggen's report "The peelstrength of ARALL. LR-397 Delft University of Technology".

Two independent test series have been conducted involving 5 rolled and 3 as-cured specimens. The test results are given in fig.4. All the rolled specimens showed significant improvement in peel strength compared with the as-cured specimens. The average Bell-peel strength of the rolled specimens gave 2.4 x the peel strength of the as-cured specimens.

According to M.Verbruggen's theory, different fracture modes can occur with Bell-peel tests (fig.5). Examination of the fracture surface shows that all the as-cured specimens show mode 1 fracture whereas all the rolled specimens show mode 2 fracture which gives higher Bell peel strength (see fig.6). The test results are found to be reproducible.

c. Blunt-notch tests

A sketch of the Blunt-notch specimen is given in fig.11. ARALL 2 (2/1 lay-up) is rolled to have a 0.4% permanent setting and tested with a K_t -factor of 2.43. Same tests have been carried out with ARALL 2 (2/1 lay-up) as-cured. No difference has been found.

d. Joint bearing tests (Mil-STD-1312)

Bearing strength of a sheet material is considered to be an important engineering property when mechanically fastened joints are used. It is certainly the case in the aerospace industry.

A test method described in Mil-STD-1312 has been used for comparing the joint bearing strengths of the materials (see fig.7).

Both ARALL 2 (2/1 lay-up) 0.4% rolled and as-cured materials are tested. It is found that all the materials have the same joint ultimate bearing strength ($P_{ultimate}$) and joint yield bearing strength (P_{yield}). $P_{yield} = 0.87 P_{ultimate}$

e. Tensile tests and compression tests

The tensile tests are carried out using the test specimen in fig.8. The compression tests are conducted according to DIN 53454 (see fig.9 and Appendix). All specimens are of the 6/5 lay-up type and the permanent setting is 0.4% for both rolled and post-stretched versions.

The test results are summarized in fig.10. It is clear that both post-stretching and rolling have a positive effect on the tensile and compressive properties of the materials. Rolling of the material gives even better results for the Young's moduli of the materials.

It should be noted that the ultimate tensile strength of the material remains unchanged after rolling which is also the case when the material is post-stretched (Marissen, R. and Vogelesang

L.B. Development of a new hybrid material : ARALL, Int. SAMPE
Conference, Cannes, France, Jan. 1981.D.

4. Brief discussion of the results

Smulders (Fibre fracture mechanism in ARALL laminates with aramid fibres, thesis work, June 1988, Delft University of Technology) suggests that aramid fibres practically have no adhesion to the epoxy matrix in ARALL. The only bonding force existing between the aramid fibres and the matrix is the so-called "clamping forces" due to the differences in the thermal expansion coefficients of the materials.

The improvement of the Bell-peel strength of the materials might be the result of the so-called "consolidation effect" of the matrix where the matrix is forced to be consolidated eliminating the micro-cracks and voids in the matrix and resulting in a higher engineering performance.

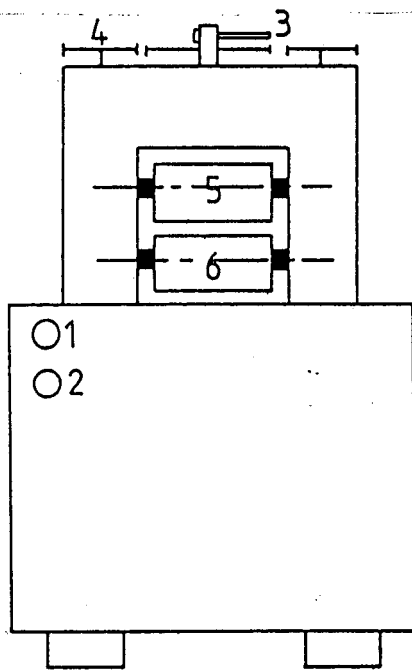
The improvements in both the tensile and compressive properties of the post-stretched laminates are the result of the Bauschinger-effect and the hardening-effect whereas when the material is rolled, the fibres in addition are probably getting better support from the matrix. This might be an explanation of the superior compressive properties of the rolled materials.

5. Conclusions

1. ARALL laminates can be rolled to have a permanent setting without damaging the material;
2. ARALL laminates, which are rolled to have a 0.4% permanent setting, show superior compressive properties compared to both the as-cured and post-stretched versions;
3. ARALL laminates, which are rolled to have a 0.4% permanent setting, show superior tensile properties compared to the as-cured version, and have similar tensile properties as compared to the post-stretched version;
4. The Bell-peel strength of rolled ARALL is at least twice as high as the as-cured ARALL laminates;
5. The fatigue properties of the rolled ARALL laminates are similar to the post-stretched ARALL laminates and are far superior to the as-cured ARALL laminates;
6. In general, rolled ARALL laminates show similar engineering properties as the post-stretched ARALL laminates. No indication of decreasing in engineering properties of rolled ARALL laminates is found compared to the post-stretched and as-cured versions;
7. Rolling of ARALL laminates is a very promising process to enhance the engineering properties of the material. It might turn out that this process is also very attractive from an economic point of view.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the assistance of the visiting students J.W.M. Geraedts, G.Fluit and Mrs.Karin Garmer.



- 1.2 ON/OFF
- 3 ADJUSTOR
- 4 COG-WHEEL
- 5.6 ROLLERS

Fig.1 Rolling machine.

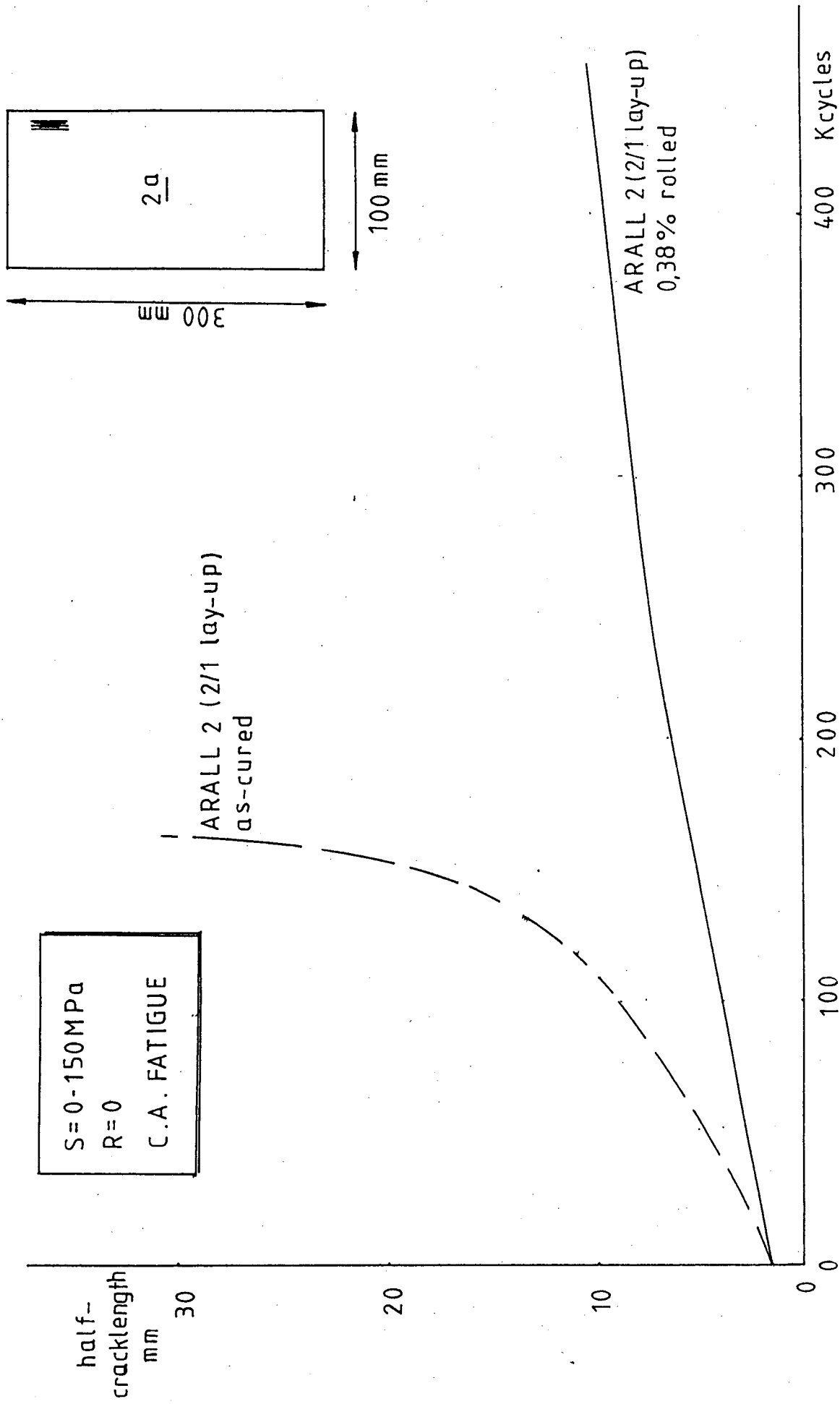
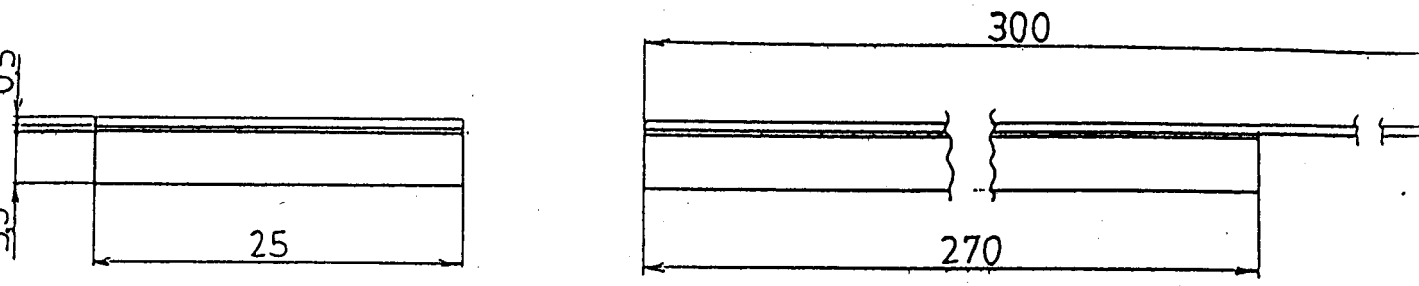
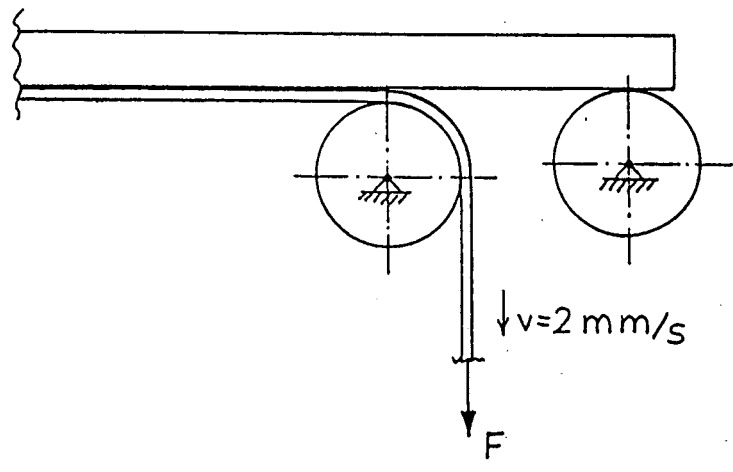


Fig. 2 Effect of rolling on fatigue property of ARALL



Geometry of the specimen

Fig.3 Bell-peel test



Principle Bell-peel test

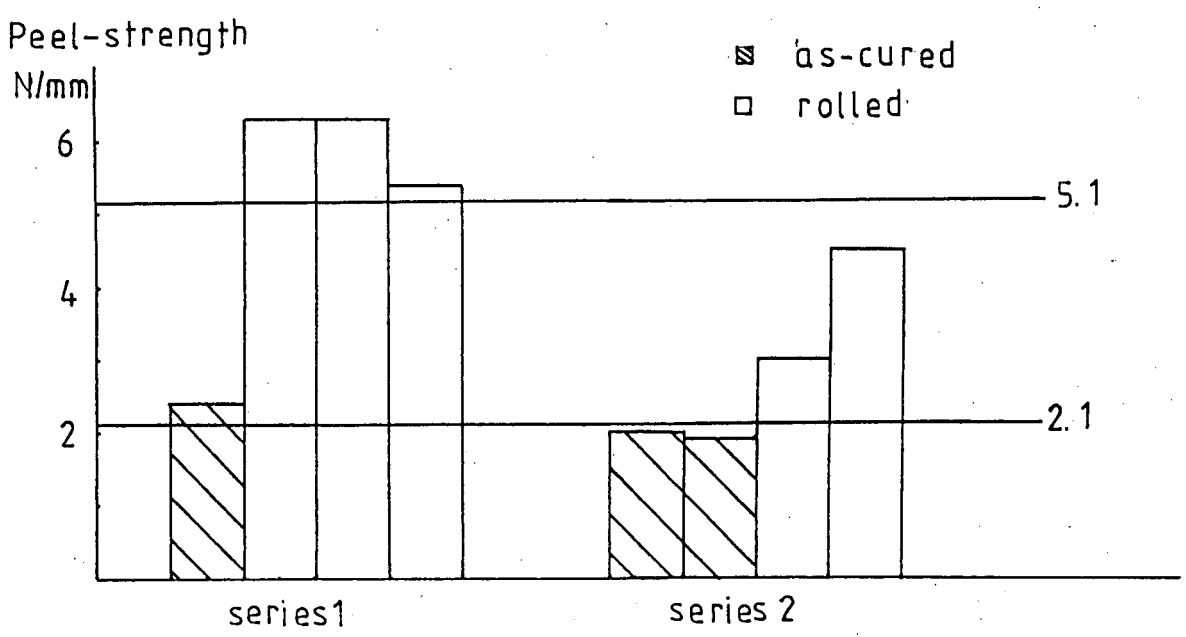
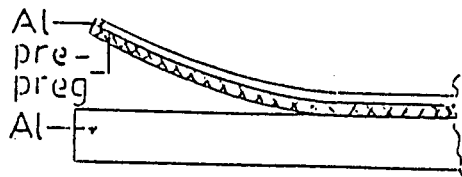
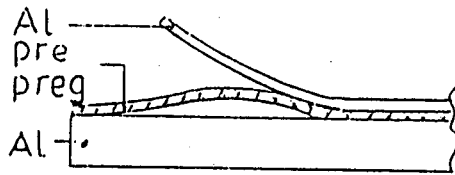


Fig.4 Effect of rolling on peel-strength



Figuur 5a:
Mode 1 fracture



Figuur 5b:
Mode 2 fracture

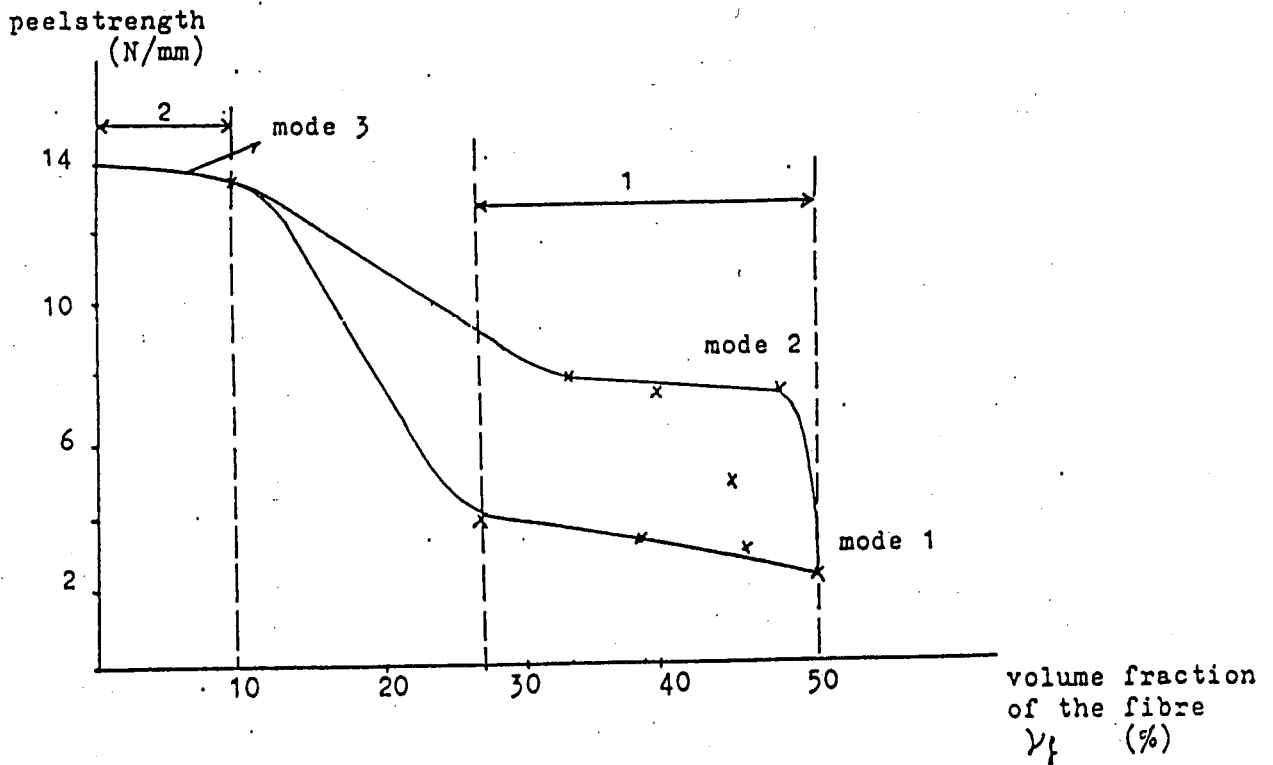


Fig.6 Peel-strength of ARALL (after Verbruggen)

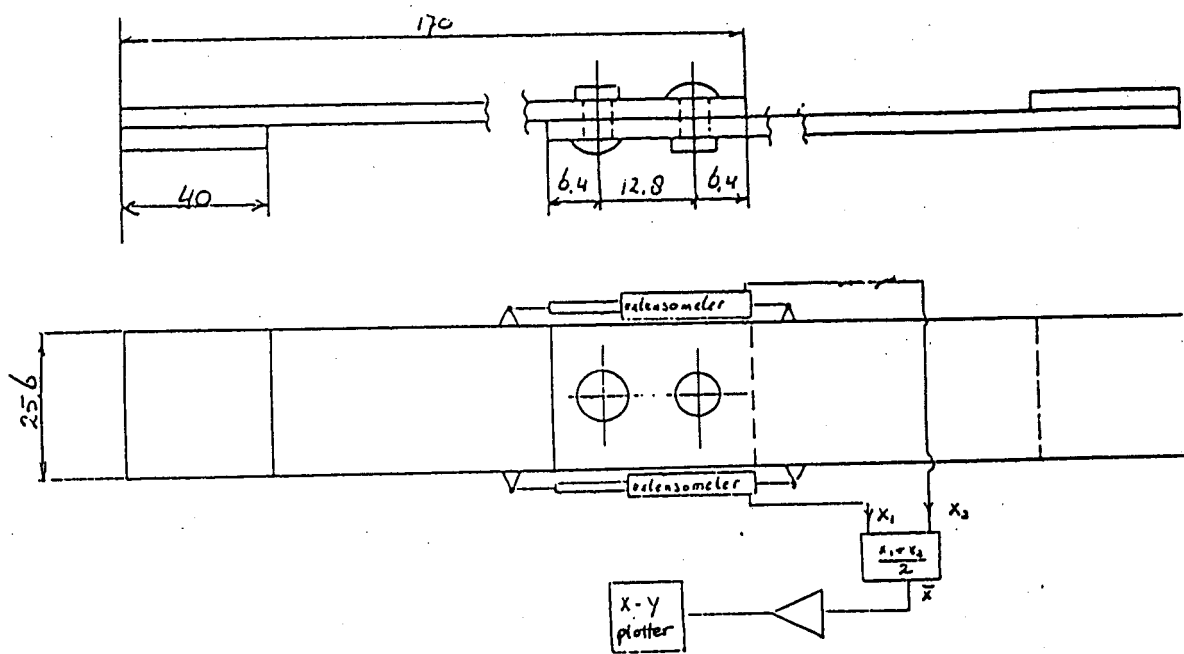


Fig. 7 Bearing strength test (MIL-STD-1312)

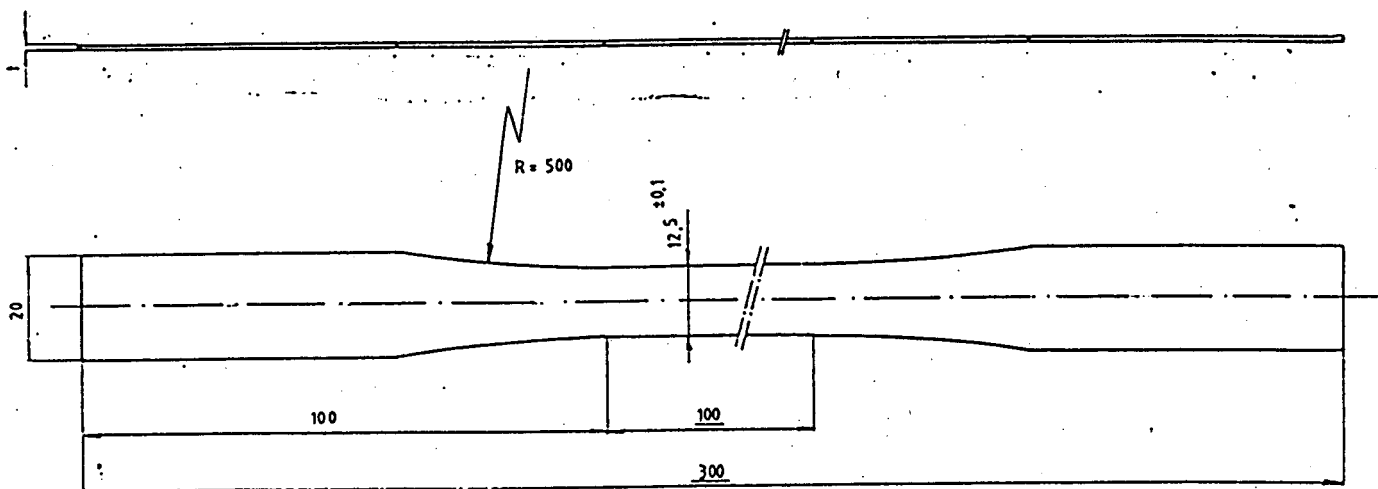
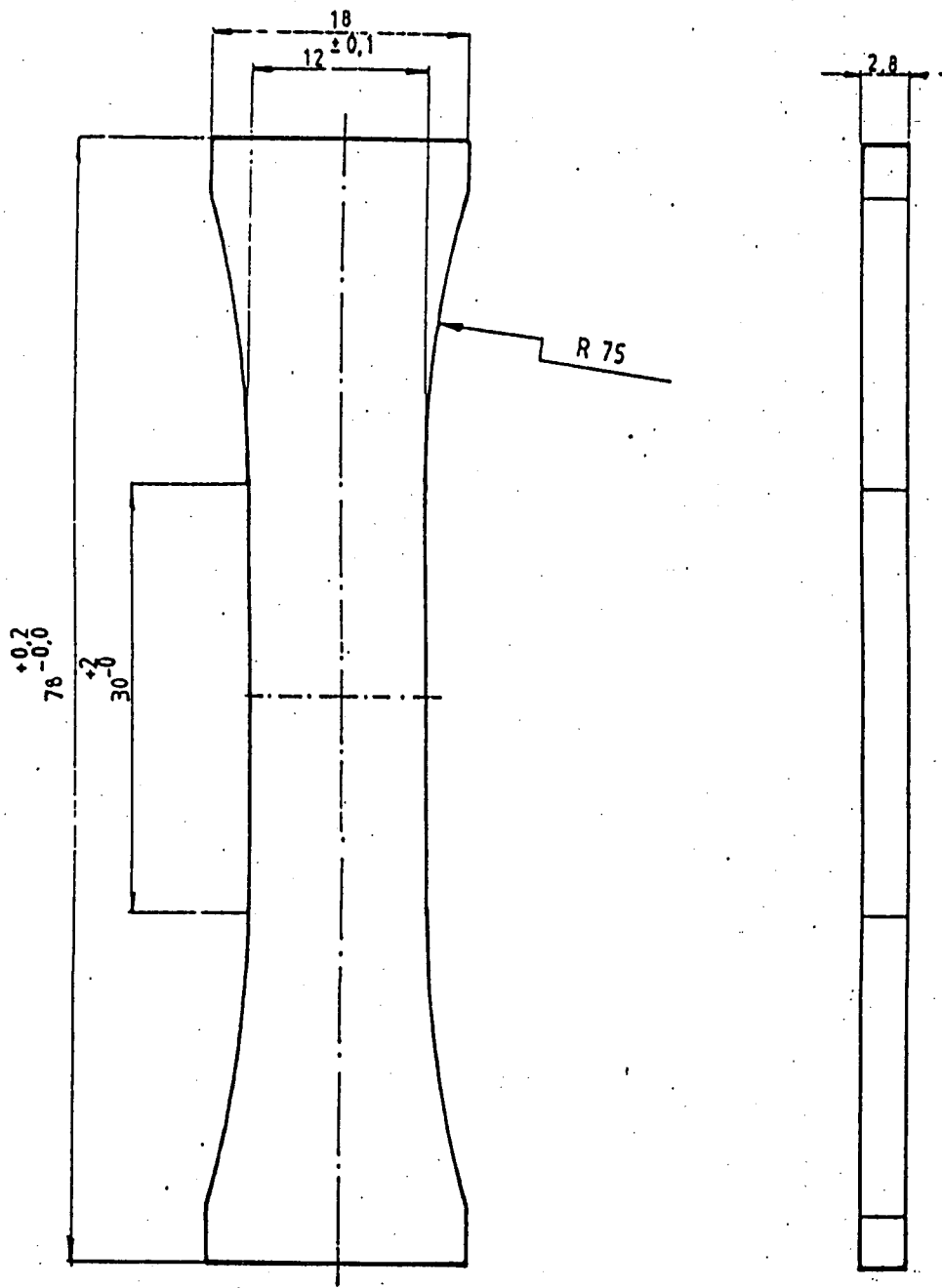


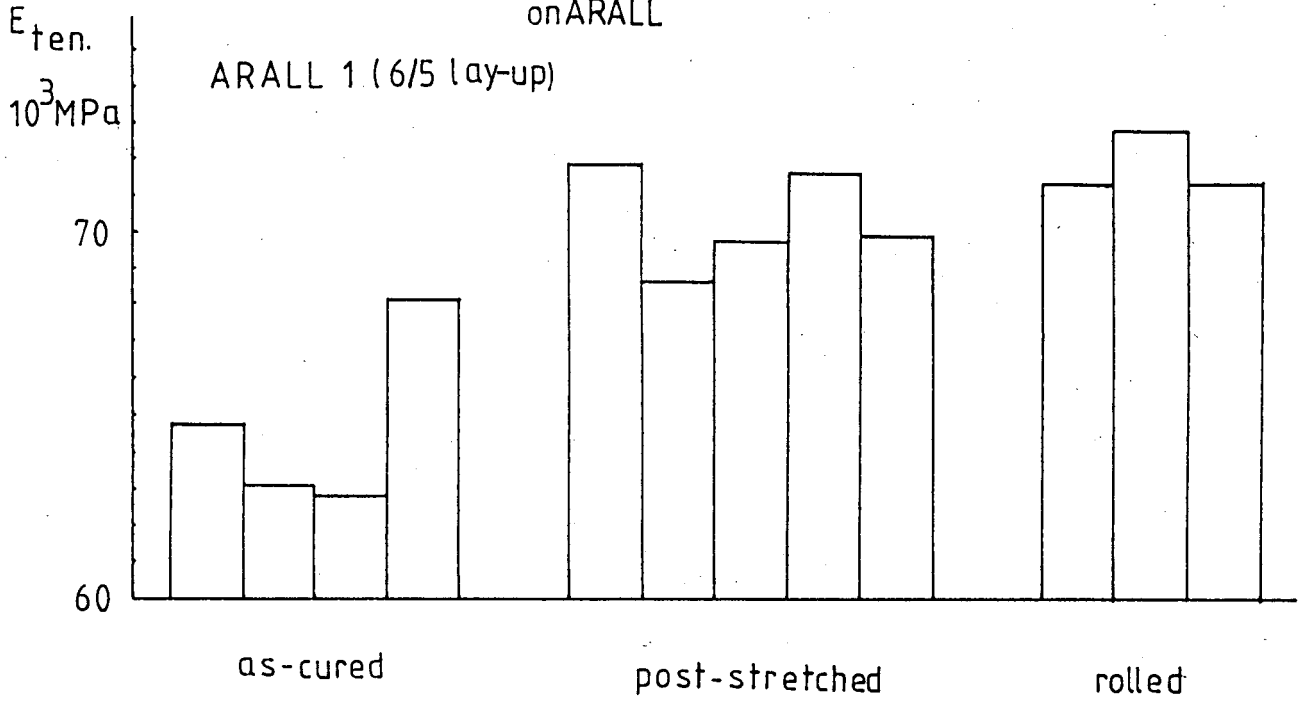
Fig. 8 Tensile specimen



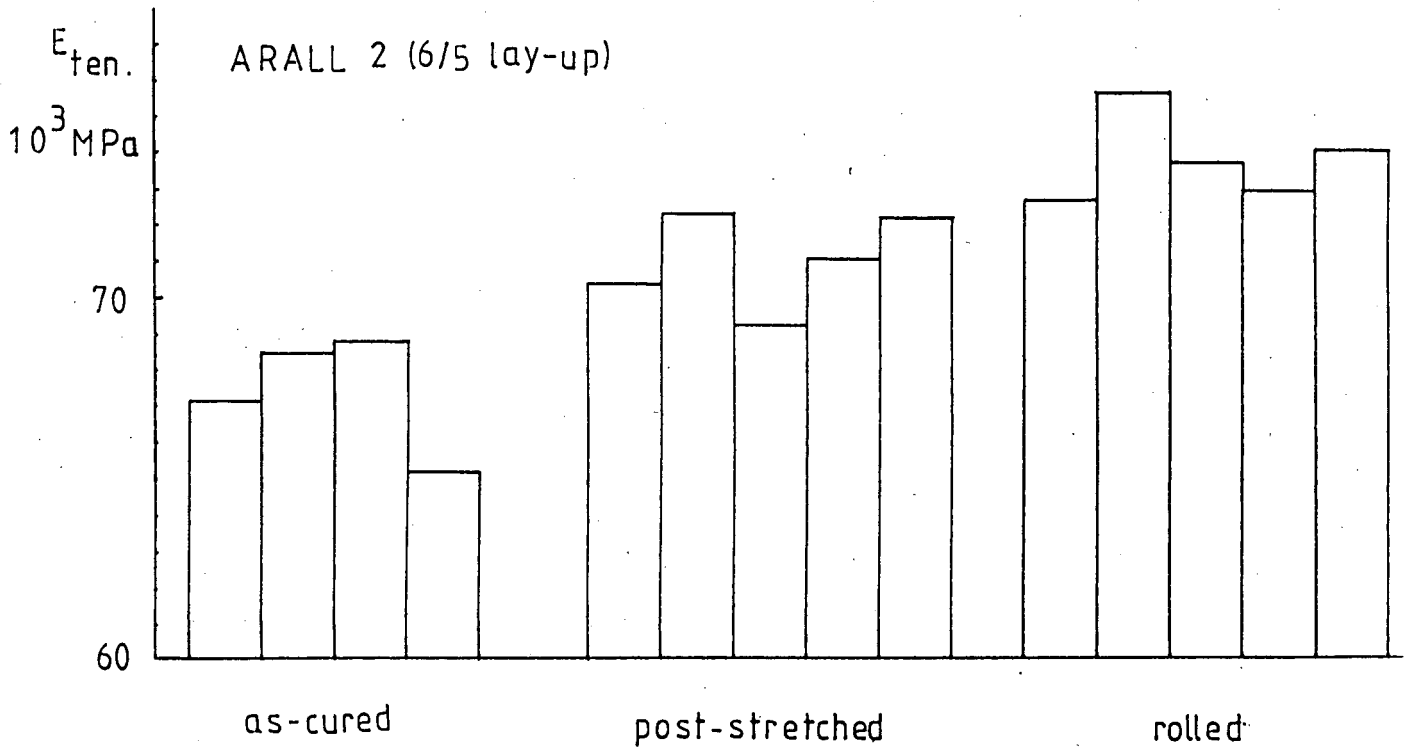
DIN 53454

Fig.9 Specimen for compression- test

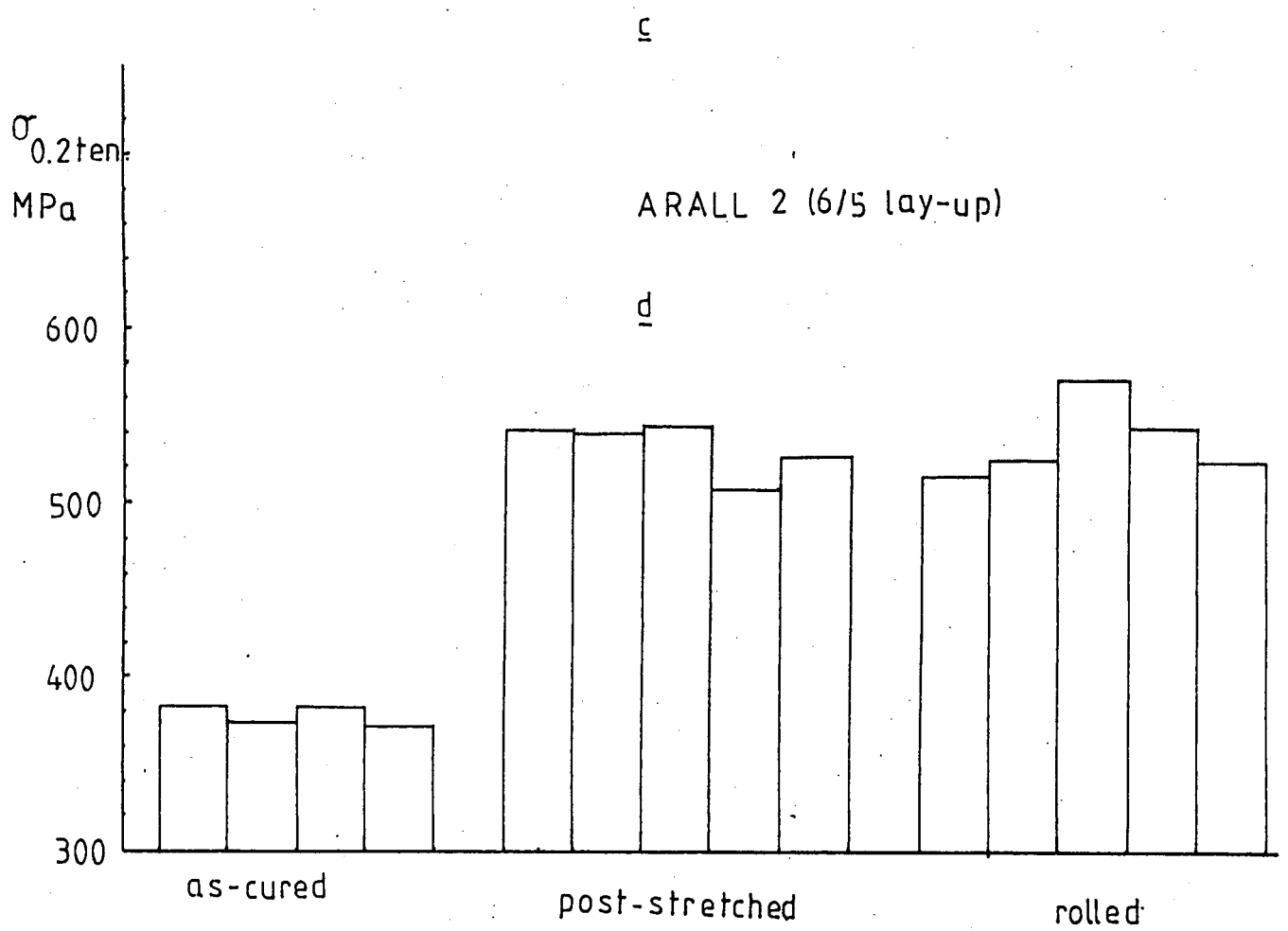
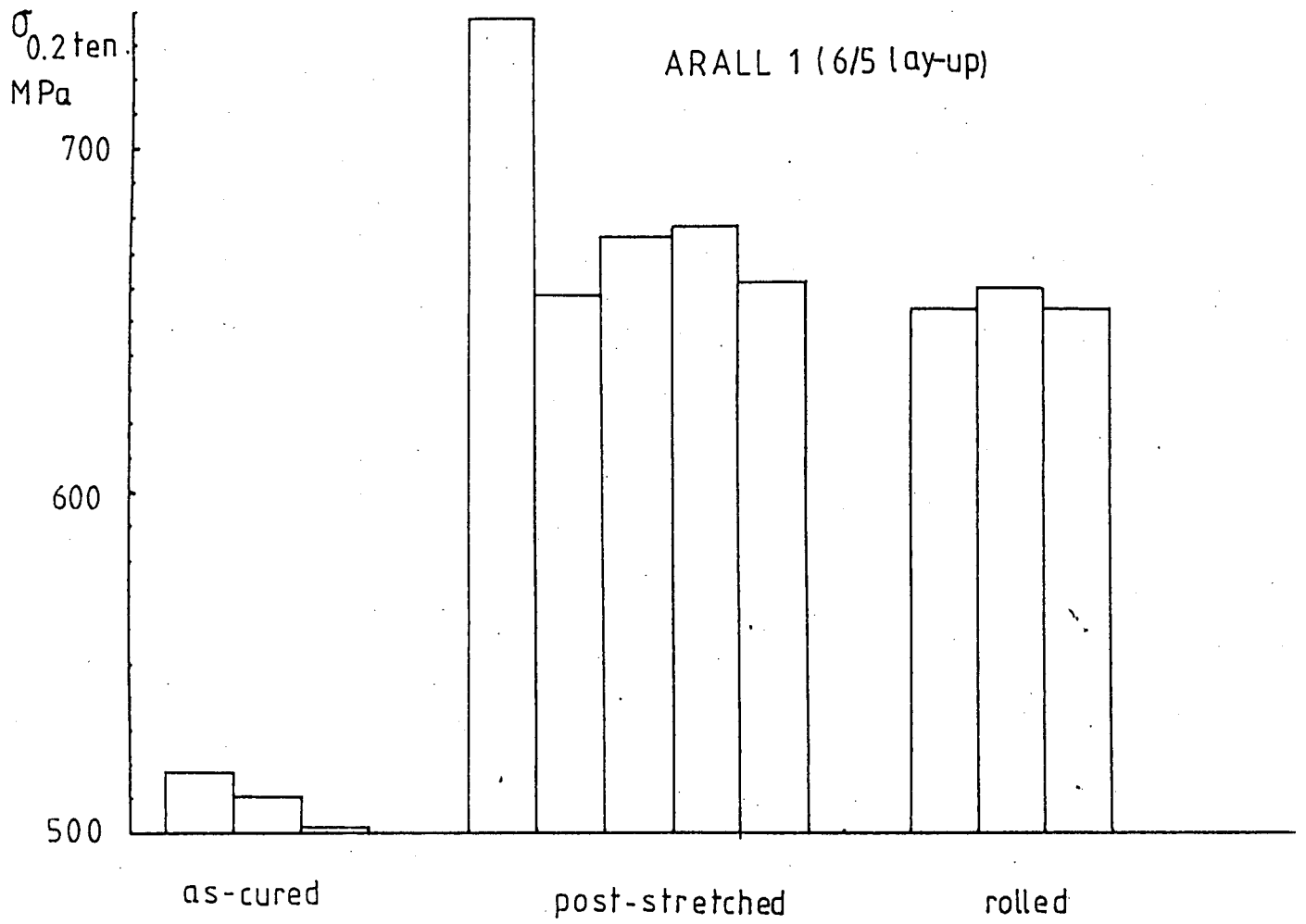
Fig.10 Effect of rolling and post-stretching on ARALL

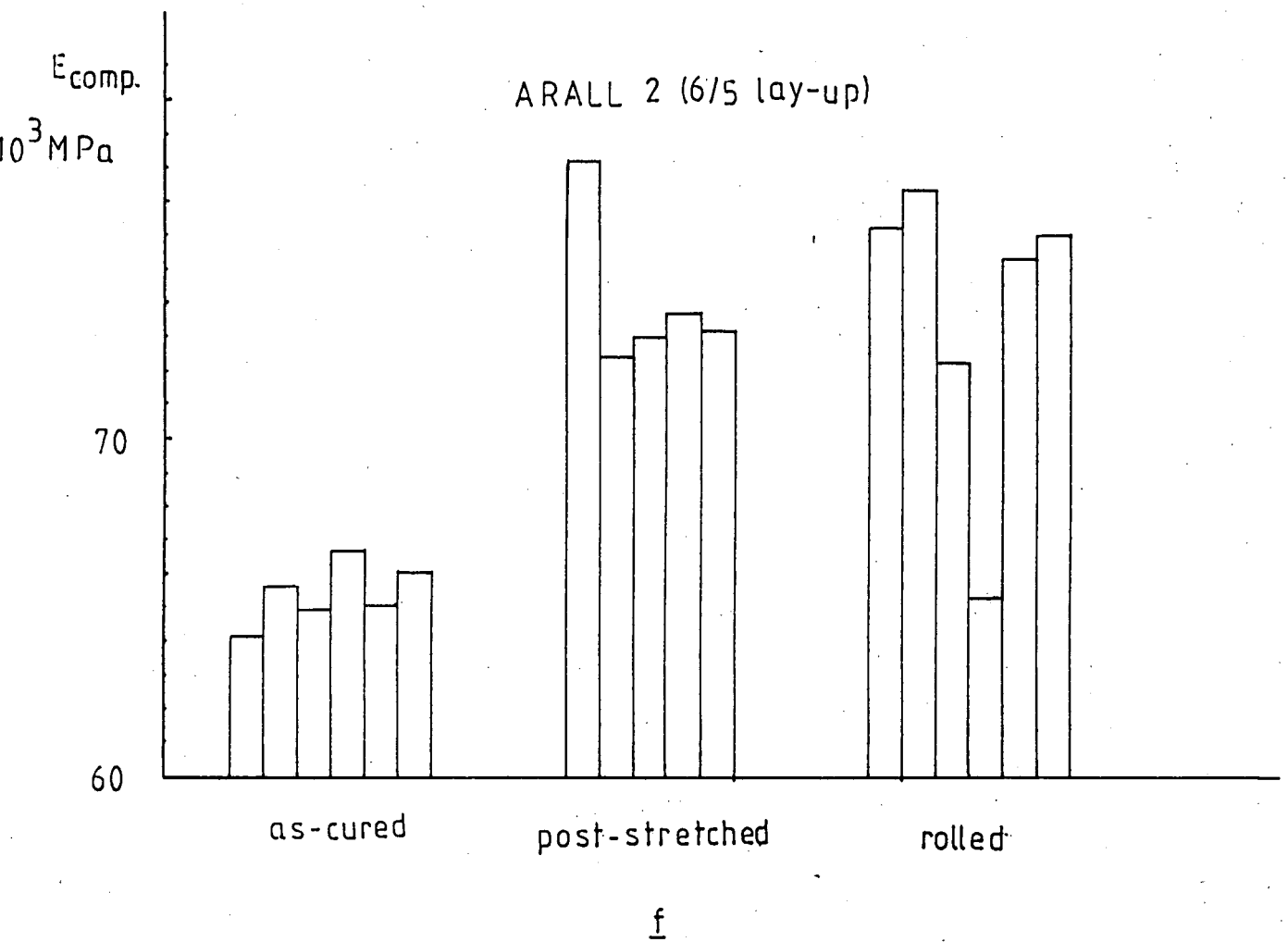
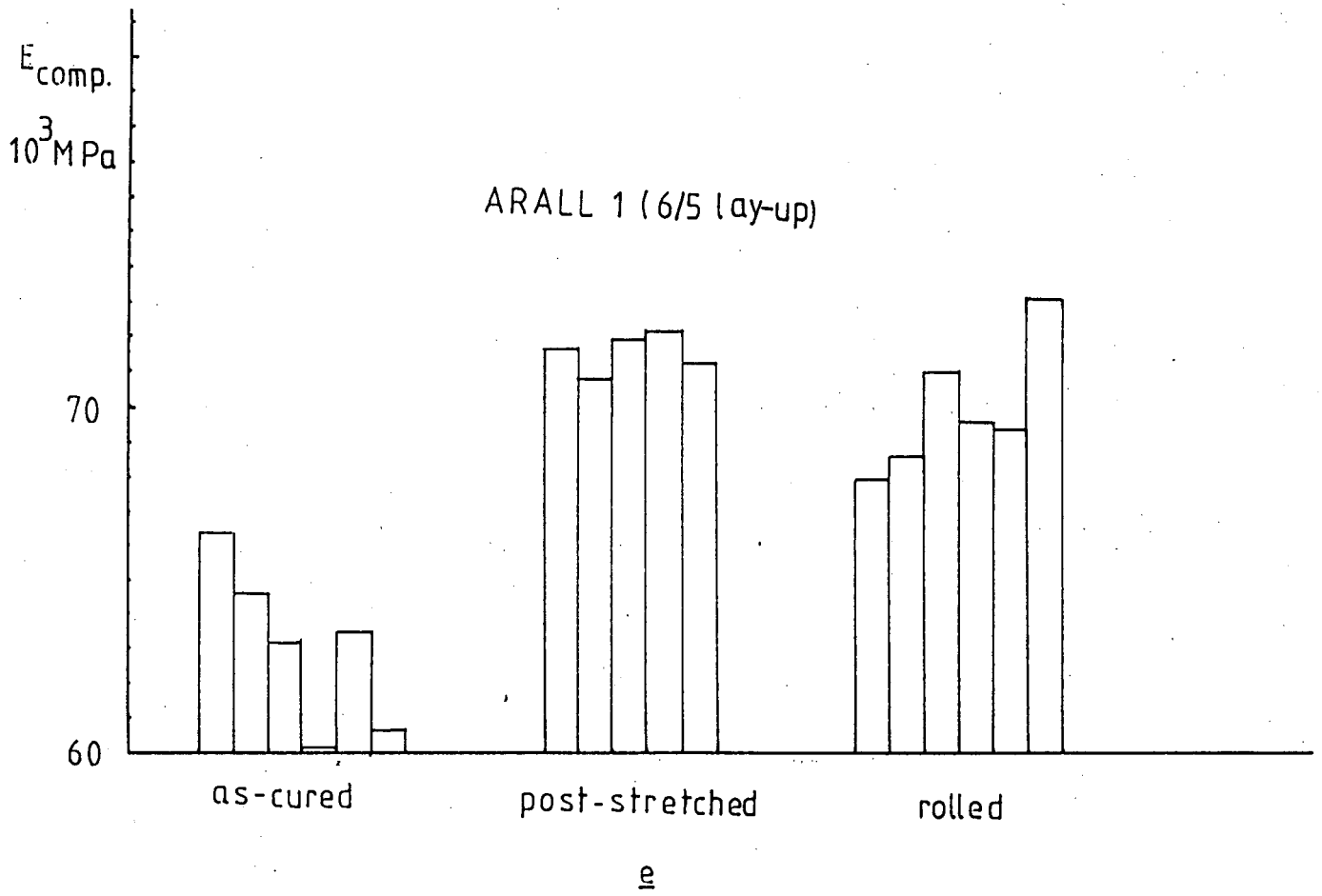


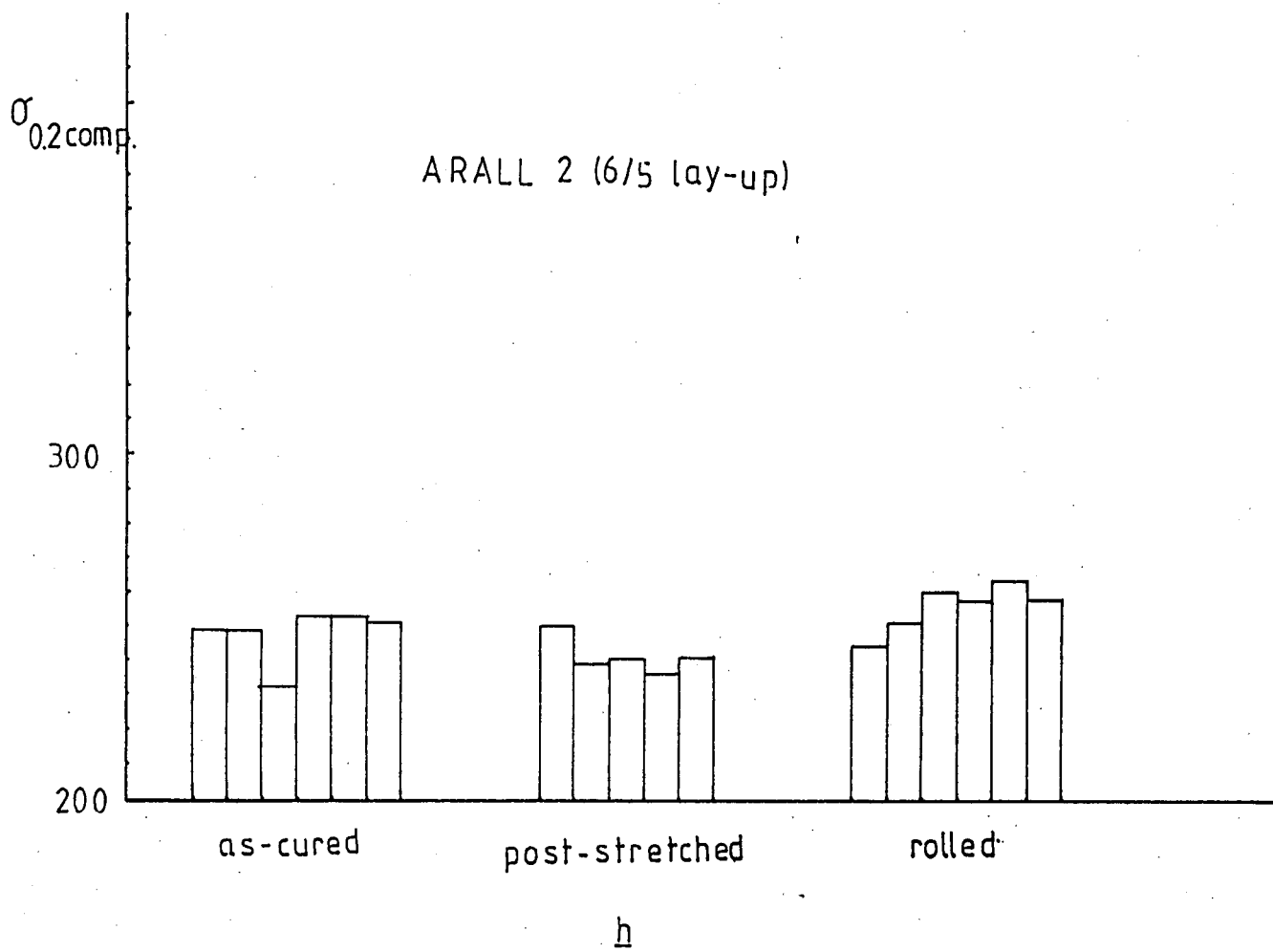
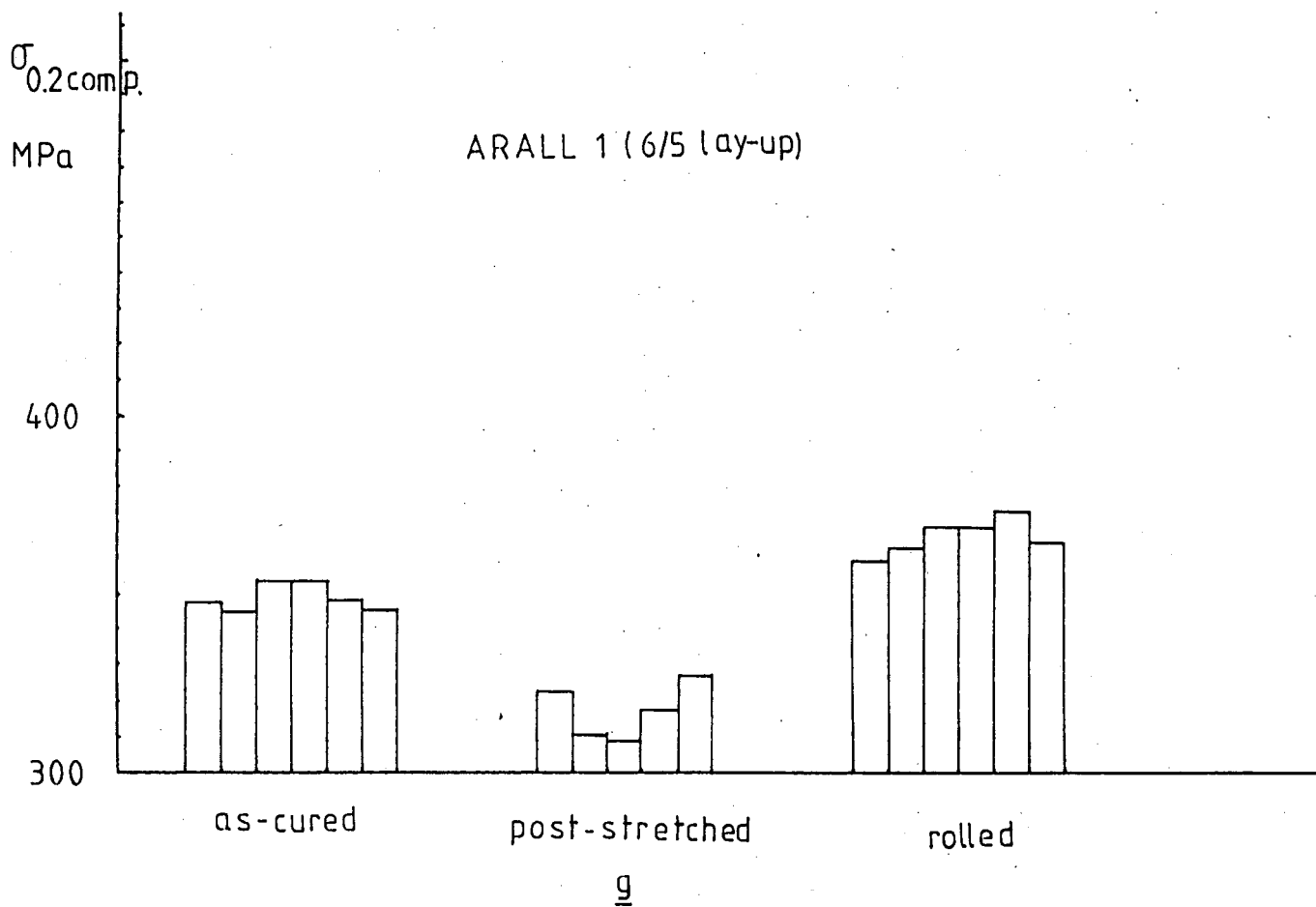
a



b







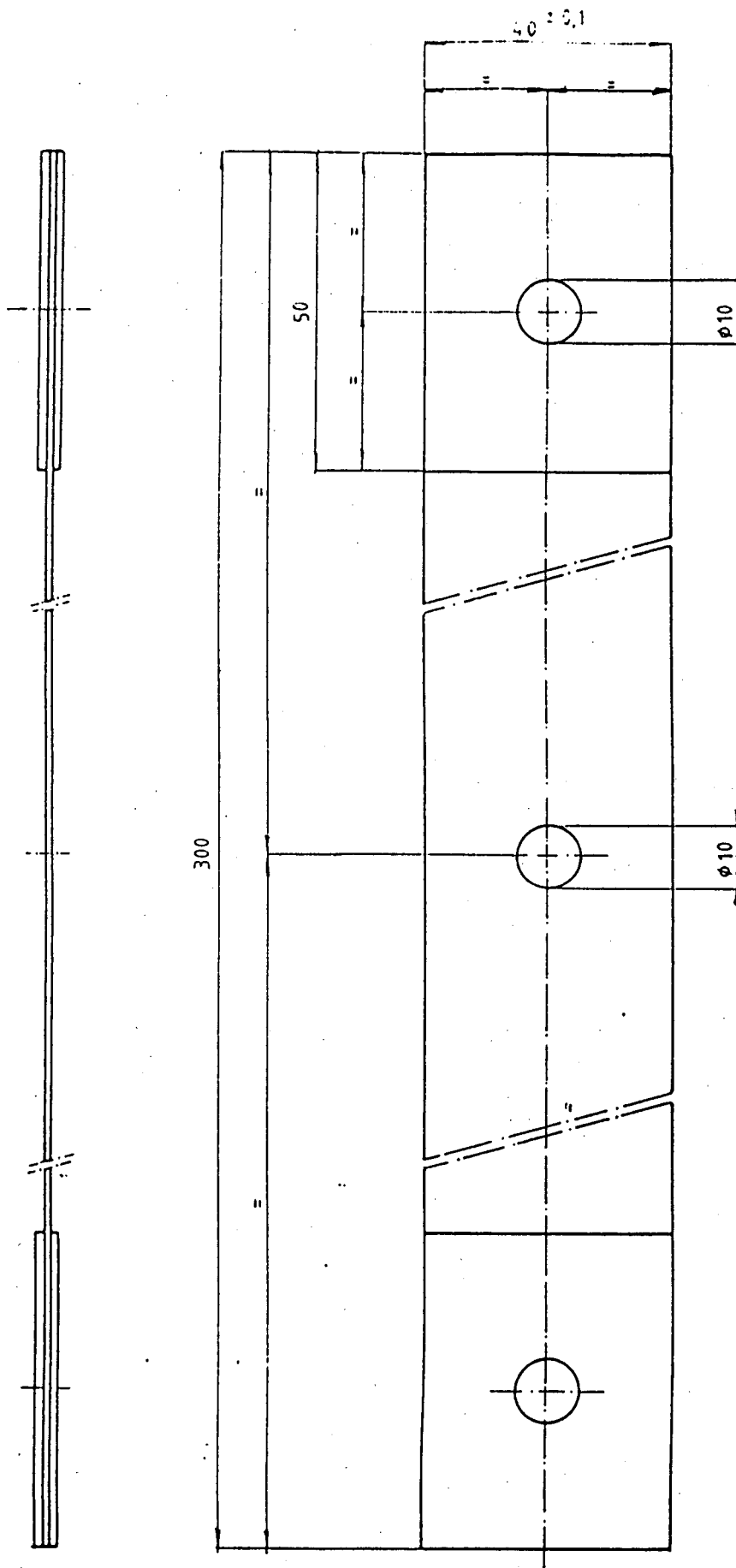


Fig.11 Blunt-notch test specimen
 $K_t = 2.43$

Erläuterungen

Diese Norm stimmt sachlich überein mit der ISO 9) Empfehlung ISO/R 179:1961 „Plastics. Determination of the Charpy impact resistance of rigid plastics (Charpy impact flexural test)“ — „Matières plastiques. Détermination de la résistance au choc de matières plastiques rigides (Essai Charpy de résistance à la flexion par choc)“ — „Kunststoffe. Schlagversuch nach Charpy an starren Kunststoffen“. Die Prüfung mit der Dynastatprobe ist deshalb auch weggelassen worden. Sie wird künftig in einer geänderten Norm festgelegt sein (siehe DIN 53 435, z. Z. noch Entwurf). Der Text des Abschnittes 10.3 ist in Übereinstimmung mit DIN 53 448^{*)} (Schlagversuch) geändert, da die bisherige Versuchsdurchführung Schwierigkeiten imitiert mit sich brachte, als nach einer gewissen Gebrauchsdauer der Geräte oder auch bei fabrikmässigen Geräten der Schleppeiszer ruheartig

vorspringen kann, was zu Fehlmessungen führt. Die neue Versuchsdurchführung verbietet die Ergebnisse nicht. Jedoch kann eine Neuinstellung der Schleppeiszerreibung notwendig sein.

Für den Fall, daß noch Pendelschlagwerte oder Dynastatgeräte mit Skalenteilung in kp/m benutzt werden, sind nachfolgende Umrechnungen notwendig 7):

kp/cm	2	5	10	20	40	150
J	0,196	0,49	0,98	1,96	3,92	14,7

Folgende Bezeichnungen von Pendelschlagwerten sind z. Z. noch vorhanden und entsprechen einander:

DIN 51 222, Ausgabe November 1968 ^{*)}	0,05	0,1	0,4	1,5
DIN 51 222, Ausgabe November 1973	0,5 J	1 J	4 J	15 J

^{*)} Folgeausgabe z. Z. noch Entwurf
⁷⁾ siehe Seite 3
⁹⁾ ISO: International Organization for Standardization
^{*)} Norm ist ungültig

**Prüfung von Kunststoffen
Druckversuch**

DIN
53 454

Testing of plastics; compression test

Zusammenhang mit der ISO-Empfehlung ISO/R 684:1967 siehe Erläuterungen.

Mode in mm

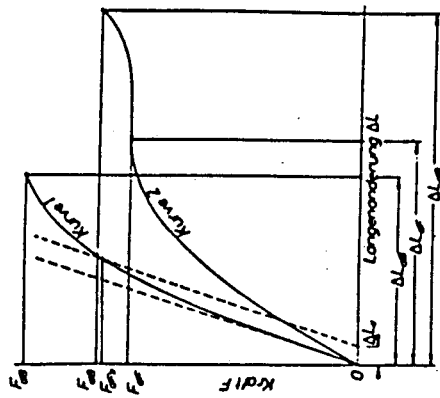


Bild 1. Kraft-Längenänderungs-Diagramm

Hierin bedeuten:

- F_{d1} Kraft bei Bruch (bei Kurve 2 nur Maximalwert, wenn Probekörper bricht)
- F_{d2} Kraft bei Querschubspannung
- F_{d1/2} Kraft bei 1/2-Querschubspannung
- F_{d2/2} Kraft bei 1/2-Querschubspannung
- ΔL_{d1} Längenänderung bei Bruch (bei Kurve 2 nur maximal, wenn Probekörper bricht)
- ΔL_{d2} Längenänderung bei der zur Querschubspannung gehörenden Kraft
- ΔL_{1/2} Längenänderung, die einer Querschubspannung von 1/2 entspricht

¹⁾ Falls die Spannung aus dem Zusammenhang nicht ohne weiteres hervorgeht, soll das Formelsymbol σ mit Index versehen werden (siehe auch DIN 1607).

1. Zweck und Anwendung
 1.1. Der Druckversuch nach dieser Norm dient zur Bestimmung des Verhaltens von Kunststoffen bei einseitiger Beanspruchung auf Druck. Die Prüfung wird an bestimmten Probekörpern unter festgelegten Bedingungen für die Vorbereitung, für das Prüfklima und für die Prüfgeschwindigkeit durchgeführt. Die Prüfergebnisse sind nur bei Einhaltung gleicher Herstellungsbedingungen für die Probekörper und gleicher Prüfbedingungen vergleichbar und deshalb auf das Verhalten beliebig gestalteter Kunststoff-Erzugnisse bei Beanspruchung auf Druck nicht ohne weiteres übertragbar. Der Druckversuch nach dieser Norm dient in erster Linie zur Qualitätskontrolle. Eine umfassende Beurteilung des Verhaltens von Kunststoffen bei Druckbeanspruchung ist nur möglich, wenn die Festigkeits- und Formänderungseigenschaften bei verschiedenen Prüfbedingungen (z. B. Prüfgeschwindigkeit, Temperatur) bestimmt und Kraft-Längenänderungs-Kurven aufgenommen werden.

1.2. Die Eigenschaften, die nach dieser Norm ermittelt werden können, sind:
 Druckfestigkeit (nur bei Probekörpern, die beim Druckversuch brechen)
 Querschubspannung
 z. 1/2-Querschubspannung

2. Begriffe

Anmerkungen: Die angegebenen typischen Übersetzungen der Begriffe sind nicht Gegenstand dieser Norm; sie dienen lediglich dem besseren Verständnis im Zusammenhang mit der ISO-Empfehlung.

2.1. „Druckspannung σ “ [nominal compressive stress] im Sinne dieser Norm ist die auf den kleinsten Anfangsquerschnitt des Probekörpers bezogene Kraft zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Versuchs.

2.1.1. „Druckfestigkeit σ_{d1} [compressive strength] ist die Druckspannung bei Bruch des Probekörpers.“
Anmerkungen: Nur wenn der Probekörper bricht, kann man von einer Druckfestigkeit sprechen.

Erläuterungen siehe Originalfassung der Norm

Fortsetzung Seite 2 bis 5

Fachnormenausschuß Kunststoffe (FNK) im Deutschen Normenausschuß (DNA)
 Fachnormenausschuß Materialprüfung im DNA

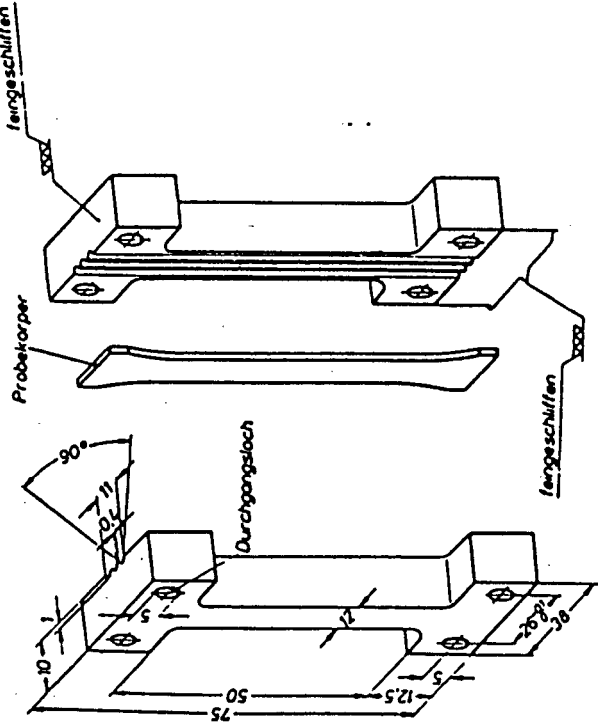


Bild 4. Stützeinrichtung für Probekörper nach Bild 3

8. Durchführung

8.1. Die Länge und die Querschnittsfläche des Probekörpers werden auf $\pm 0,2\%$, jedoch auf nicht mehr als $\pm 0,01$ mm gemessen.
 8.2. Die Prüfung wird, sofern nicht anders vereinbart (siehe auch Abschnitt 1) oder in den Normen für das betreffende Erzeugnis angegeben ist, im Normatmosphäre von $23/50$ DIN 50 014 (d. h. $[22 \pm 2]^\circ\text{C}$ und $(50 \pm 3)\%$ relative Luftfeuchtigkeit) durchgeführt.

8.3. Der Probekörper wird so zwischen die Druckplatten eingebracht, daß die zu düstenden Flächen des Probekörpers parallel zu den perfieren Flächen der Druckplatten stehen. Die Richtung der längs des Probekörpers muß mit der Richtung der Druckkraft übereinstimmen. Der Probekörper muß so stehen, daß sich die Druckkraft gleichmäßig auf die zu drückenden Flächen des Probekörpers verteilt. (siehe Bild 4) eingelegt. Es ist darauf zu achten, daß das über die Stützeinrichtung hinausragende Probekörperende von 1 bis 2 x Dicke nicht auskündet. Gegebenenfalls muß der Probekörper gekürzt oder bei stark stochernden Erzeugnissen verlängert werden. Die beiden Teile der Stützeinrichtung werden so zusammengeschrubt, daß sie die Oberflächendes Probekörpers nur leicht berühren, ohne die Stöuchung zu behindern.

7 $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N (Newton)} \approx 10 \text{ N}$
 $1 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 0,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} ; 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 10 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$

8.4. Zur Bestimmung der Festigkeit und Stöuchung wird der Probekörper bei einer während des Versuches möglichst gleichbleibenden Prüfgeschwindigkeit zusammengedrückt. Als Prüfgeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit bezeichnet, mit der sich die beiden Druckplatten einander nähern. Als Prüfgeschwindigkeit v in mm/min ist vorzugsweise zu wählen (außer in den Normen für das zu prüfende Erzeugnis nichts angegeben ist): $v = 1, 2, 3, 10, 20, 50$ oder 100 oder $v = 0,03 L$ (L ist die Länge des Probekörpers in mm).

8.5. Während des Versuches sind die zeitlich zusammengehörigen Werte für die Druckkraft und die Längsänderung in so engen Zeitabständen abzulesen, daß daraus eine Kraft-Längsänderungskurve geschätzt werden kann. Weiterhin ist festzustellen, ob der Probekörper bricht. *Anmerkung: Es empfiehlt sich, ein Registriergerät für die Aufzeichnung der Kraft-Längsänderungskurve zu benutzen. Dabei ist zu beachten, daß die Aufzeichnung der Kurve nicht mehr als 60° beträgt.*

9. Auswertung

9.1. Druckfestigkeit σ_{JB} in N/mm^2 bzw. kp/cm^2

$$\sigma_{JB} = \frac{F_{JB}}{A}$$

9.2. Quetschspannung σ_{JF} in N/mm^2 bzw. kp/cm^2

$$\sigma_{JF} = \frac{F_{JF}}{A}$$

9.3. Die $x\%$ Stöuchung σ_{JF} wird ermittelt, indem man durch den Abzisswert JL_x der einer Stöuchung von $x\%$ entspricht, eine Parallele zur Anfangstangente der Kraft-Längsänderungskurve legt. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Kraft-Längsänderungskurve ergibt die der $x\%$ Stöuchung entsprechende Kraft F_x .

Anmerkung: Bei der $0,1\%$ Stöuchung $\sigma_{JF,0.1}$ ist $JL_x = 0,01 \cdot L$, bei der 1% Stöuchung $\sigma_{JF,1}$ ist $JL_x = 0,01 \cdot L$.

In Abschnitt 9.1 bis 9.3 bedeuten:
 F_{JB} Kraft bei Bruch in N bzw. kp
 F_{JF} zur Quetschspannung gehörende Kraft in N bzw. kp
 F_x zur $x\%$ Stöuchung gehörende Kraft in N bzw. kp
 A kleinster Anfangsquerschnitt des Probekörpers in mm^2 bzw. cm^2

9.4. Stöuchung beim Bruch ϵ_{JB} in $\%$

$$\epsilon_{JB} = \frac{\Delta L_{JB}}{L} \cdot 100$$

9.5. Stöuchung bei Quetschspannung ϵ_{JF} in $\%$

$$\epsilon_{JF} = \frac{\Delta L_{JF}}{L} \cdot 100$$

In Abschnitt 9.4 und 9.5 bedeuten:
 ΔL_{JB} Längsänderung bis zum Bruch in mm
 ΔL_{JF} Längsänderung bis zu der zur Quetschspannung gehörenden Kraft in mm
 L Ursprüngliche Länge des Probekörpers in mm

9.6. Für jede Versuchsreihe ist jeweils der arithmetische Mittelwert sämtlicher gemessener Werte einschließlich der Standardabweichung zu berechnen.

10. Prüfbericht

Im Prüfbericht sind unter Hinweis auf diese Norm anzugeben:

- Art, Lieferform und Bezeichnung des Erzeugnisses
- Herstellernamen und -verfahren der Probekörper
- Lage der Probekörper im Erzeugnis
- Form und Abmessungen der Probekörper
- Anzahl der Probekörper
- Vorbereitung der Probekörper (gegebenenfalls dabei äußerlich erkennbare Veränderungen)
- Prüflinien, sofern von dieser Norm abweichend
- Prüfgeschwindigkeit in mm/min

Mittelwert und Standardabweichung für:
 Druckfestigkeit σ_{JB} in N/mm^2 bzw. kp/cm^2
 Quetschspannung σ_{JF} in N/mm^2 bzw. kp/cm^2
 $x\%$ Stöuchung $\sigma_{JF,x}$ in N/mm^2 bzw. kp/cm^2
 (gegebenenfalls $\sigma_{JF,0.1}$ für $x = 0,1$ und $\sigma_{JF,1}$ für $x = 1$)
 Stöuchung beim Bruch ϵ_{JB} in $\%$
 Stöuchung bei Quetschspannung ϵ_{JF} in $\%$

Falls vorhanden, Kraft-Längsänderungs-Diagramm
 Aussehen der Probekörper nach dem Versuch, besonders ob die Probekörper gebrochen sind
 Prüfdatum

7 Statistische Auswertungsverfahren siehe DIN 53 302 Blatt 1 und Blatt 2; statistische Auswertung von Meßergebnissen bei Prüfung von Kautschuk und Elastomeren siehe DIN 53 378 Blatt 1 (Vorname Juli 1967).

