

Analyse trek- en torsieproef

Citation for published version (APA):

Pouwels, A. S. W. C. (1990). *Analyse trek- en torsieproef*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA0899). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1990

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Analyse trek- en torsieproef

HS - Venlo stageverslag 2

door A.S.W.C. Pouwels

mei 1990

VF code C2 WPA nr 0899

INHOUDSOPGAVE

	pagina
Samenvatting	3
Summary	4
§1 Inleiding	5
§2 Trekproef	6
§2.1 Bridgman correctie	7
§3 De torsieproef	8
§3.1 Methode van Pöhlandt	9
§4 Practische benadering van de spanning – rek relaties	10
§4.1 Bepaling van de vloeiparameters m.b.v. het programma NCMOD	11
§4.1.1 Conclusies uit de NCMOD berekeningen	12
§4.2 Bepaling van de C- en n- waarden met het programma GRAPHER	13
§4.2.1 Conclusies uit de GRAPHER berekeningen	14
Literatuurlijst	15
Bijlagen	

SAMENVATTING

Bij het koudvervormen van staal neemt de deformatieweerstand toe, dit verschijnsel wordt het versterkend gedrag genoemd. Met een versterkingsmodel wordt dit gedrag door een wiskundige vergelijking beschreven: versterkingsmodellen beschrijven de relatie tussen spanning en rek.

In dit verslag wordt de uitvoering van trek- en torsieproeven beschreven, tijdens de proeven worden diverse grootheden gemeten die omgerekend worden tot rekken en spanningen. Met behulp van computerprogramma's worden diverse versterkingsmodellen getoetst.

SUMMARY

During the cold forming of steel the resistance to deformation increases, this phenomenon is called the "strain hardening". A strain hardening model is used to describe this behaviour by a mathematical function. Strain hardening models describe the relationship between stress and strain.

In this report the implementation of tension- and torsion tests is described, during the tests several quantities are measured which will be converted in stress and strain. Using computerprograms several strain hardeningmodels are being tested by practical experience.

§ 1 INLEIDING

Om de versterking van staal C45 in diverse vlakken te onderzoeken in het geval van trek en torsie wordt er gebruik gemaakt van de Vickers hardheidsmethode. De Vickers hardheidsmethode is in het vorige verslag uitgebreid aan de orde geweest (lit.[1]); dit verslag zal de uitvoering van trek- en torsieproeven en de verwerking van de meetgegevens behandelen.

De bij de trek- en torsieproef gemeten krachten en diameters resp. momenten en hoekverdraaiingen moeten omgerekend worden tot spanningen en rekken. Op deze manier worden de proeven met elkaar vergelijkbaar.

Als referentie worden enkele trek- en torsieproeven uitgevoerd tot breuk optreedt. Deze referentieproeven geven informatie over het materiaal.

§ 2 DE TREKPROEF

De trekproef is een standaardproef die gebruikt wordt om materiaaleigenschappen te onderzoeken, in dit geval de vloeiparameters van staal C45.

Als trekbank wordt een Monsanto tensometer gebruikt met een maximale trekkracht van 20 kN. In verband met deze maximale trekkracht worden de voor de proeven gebruikte staven afgedraaid tot \varnothing 6mm. De kracht wordt afgelezen via een kwikkolom op de trekbank en de staafdiameter wordt gemeten met een schroefmaat. Bij insnoering wordt de diameter gemeten met een schuifmaat (de schroefmaat heeft cilindervormige koppen zodat niet in de insnoering gemeten kan worden); de afrondingsstraal van de insnoering wordt gemeten met een profielprojector. Deze straal wordt gebruikt in de formule voor de Bridgman correctiefactor (zie § 2.1).

Uit de gemeten waarden worden vloeispanningen (symbool: σ_f) en rekken (symbool: ϵ) bepaald. Door de waarden in te voeren in het computerprogramma NCMOD kan het $\sigma - \epsilon$ diagram (de vloeicurve) opgetekend worden (zie § 4).

Voor de optredende spanning in de trekstaaf geldt de volgende formule (voor insnoering):

$$\sigma_f = F / (k_n \cdot d^2) \quad (1)$$

Waarbij: σ_f = vloeispanning [N/mm²]

F = trekkracht [N]

d = staafdiameter [mm]

De rek volgt uit:

$$\epsilon = 2 \ln(d_0 / d) \quad (2)$$

Waarbij: ϵ = effectieve rek [-]

d = momentane diameter van de proefstaaf [mm]

d₀ = uitgangsdiameter van de proefstaaf [mm]

§ 2.1 BRIDGMAN CORRECTIE

Bij toenemende plastische deformatie ontstaat er op een gegeven moment een insnoering in de trekstaaf. In dit gebied, waarin zich de verdergaande deformatie concentreert, heerst geen lijnspanningstoestand meer; dit was een voorwaarde voor de geldigheid van formule (1). De resultaten berekend met formule (1) zijn dus maar geldig in een beperkt gebied.

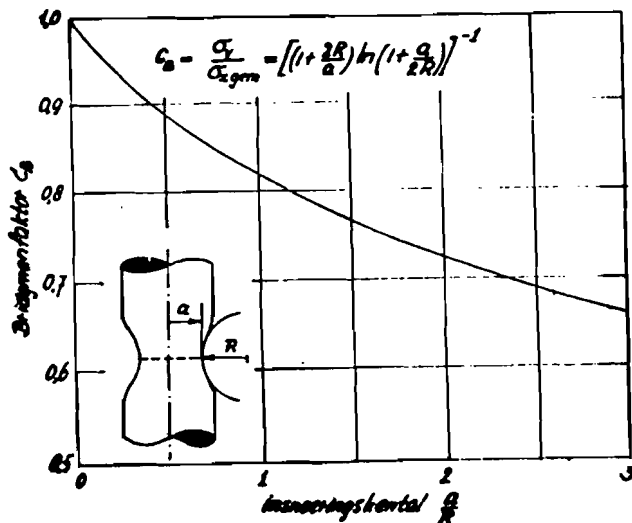
De analyse van Bridgman maakt het mogelijk een correctiefactor te berekenen voor formule (1) om het effect van de insnoering in de berekening mee te nemen. De afleiding van de Bridgman correctiefactor is een complexe berekening welke ik hier verder buiten beschouwing wou laten, en me beperken tot het eindresultaat:

$$C_B = [(1+2R/a) \cdot \ln(1+a/2R)]^{-1} \quad (3) \quad (\text{lit.}[2]+[3])$$

waarbij: C_B = Bridgman correctie [-]
 R = afrondingsstraal van de insnoering [mm]
 a = halve diameter van de insnoering [mm]

$$\text{Formule (1) met Bridgman correctie: } \sigma_f = C_B \cdot F / (\frac{1}{4}\pi \cdot d^2) \quad (4)$$

Het quotiënt a/R wordt het insnoeringskental genoemd en bepaalt de waarde van de Bridgman correctiefactor (zie figuur 1).

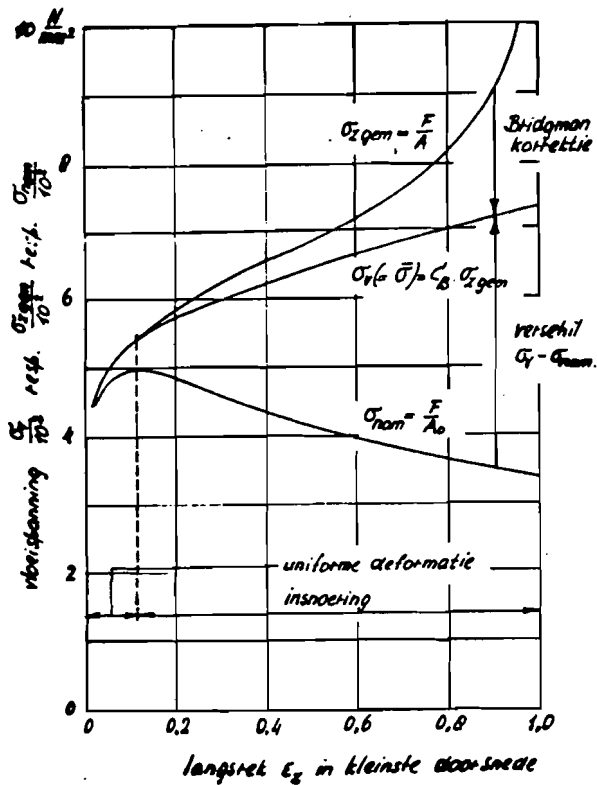


figuur 1 Bridgman correctiefactor als functie van het insnoeringskental (bron:[3])

Omdat de correctiefactor kleiner is dan 1 is de gecorrigeerde spanning ook kleiner dan de nominale spanning. Hierin stelt de onderste kromme de nominale trekkromme voor waarin de nominale spanning is gedefinieerd als het quotiënt van de trekkracht en het oorspronkelijke dwars oppervlak van de trekstaaf.

De nominale trekkromme heeft geen technologische betekenis. De bovenste trekkromme wordt verkregen als ook in het gebied van de insnoering een lijnspanningstoestand wordt verondersteld. De spanning is dan gedefinieerd als het quotiënt van kracht en (kleinste) momentane oppervlak in dwarsdoorsnede.

De middelste kromme ontstaat door de toepassing van de Bridgman correctie op de bovenste kromme (formule (4)). De uitkomst hiervan wordt aanvaard als technologisch representatief voor het plastisch materiaalgedrag.



figuur 2 diverse spanning - rek diagrammen (bron:[3]).

§ 3 DE TORSIEPROEF

De torsieproef is net als de trekproef een standaardproef om het materiaalgedrag te bepalen en diverse vloeiparameters b.v. C- en n- waarden te bepalen. De torsieproeven zijn uitgevoerd op een Amsler torsiebank, tijdens de torsieproef worden moment en hoekverdraaiing gemeten. Door een Omnigraphic X-Y schrijver wordt de moment-hoekverdraaiing kromme opgetekend.

De C- en n- waarde kunnen direct uit de moment-hoekverdraaiing kromme ($M - \phi$ kromme) bepaald worden op een soortgelijke manier als bij de trekkromme, namelijk door de meetpunten, in dit geval M en ϕ , dubbellogaritmisch tegen elkaar uit te zetten. Uit de wiskundige vergelijking van de lijn door de punten kunnen de C- en n- waarde berekend worden (zie § 4.2).

§ 3.1 METHODE VAN PÖHLANDT

Met de torsiebank wordt een $M - \phi$ curve opgenomen. Het is interessant om deze $M - \phi$ curve om te vormen tot een $\sigma_r - \epsilon$ curve (vloei-curve) zodat een direct vergelijk met de trekproef mogelijk wordt. Het berekenen van spanningen en rekken uit de moment-hoekverdraaiing curve kan gebeuren met een methode die door Pöhlandt is ontwikkeld (lit.[4]).

Berekening van de schuifspanning aan de oppervlakte heeft enkele nadelen zoals:

- Maximaal verstoord materiaal aan de oppervlakte door oxidatie, gas opnames en spanningen door haarscheuren.
- Het oppervlak is het meest gevoelig voor kerfwerkingsinvloeden.

Door nu de schuifspanning en de afschuiving te berekenen op een kleinere straal dan de proefstaafstraal kan een betrouwbare vloei-curve berekend worden. De straal waarbij de vloeispanning niet afhangt van de verstevigingsexponent n is de gezochte waarde: de zogenaamde "kritische straal". Uit de berekeningen van Pöhlandt volgt dat de kritische straal $= r = (3/4) \cdot R$.

Formules van Pöhlandt:

$$\epsilon = (\pi \cdot \sqrt{3/2}) \cdot (R/L) \cdot \phi \quad [-] \quad (5)$$

$$\sigma_r = (3\sqrt{3/2\pi}) \cdot (1/R^3) \cdot M \quad [N/mm^2] \quad (6)$$

waarbij:

R	= proefstaafstraal	[mm]
L	= proefstaaf lengte	[mm]
ϕ	= torsiehoek	[rad]
M	= torsiemoment	[Nmm]

§4 PRACTISCHE BENADERING VAN DE SPANNING – REK RELATIES

Bij het koudvervormen van staal neemt de deformatieweerstand toe. Dit zogenaamd verstevigend gedrag kan door dislokatietheorieën verklaard worden. Met deze theorieën kan het verstevigend gedrag niet kwantitatief bepaald worden. Om het verstevigend gedrag van staal C45 experimenteel te bepalen wordt gebruik gemaakt van trek- en torsieproeven waarbij het vloeigedrag in het hele rektraject tot breuk gemeten wordt.

Bij de trekproeven worden krachten, diameters en eventueel profielradius gemeten. Hieruit worden spanning en rek bepaald m.b.v. formule (1), (2), (3) en (4). Bij de torsieproeven moeten de gemeten momenten en hoekverdraaiingen omgezet worden in spanningen en rekken met behulp van de methode van Pöhlandt: formules (5) en (6). Deze waarden zijn ingevoerd in computerprogramma's die aan de hand van een gekozen verstevigingsmodel de bijbehorende vloeiparameters berekenen.

Er zijn zeer veel factoren die het plastisch gedrag van staal bepalen. Met een verstevigingsmodel wordt geprobeerd het plastisch gedrag door een wiskundige vergelijking te beschrijven. In een verstevigingsmodel kan slechts met enkele parameters rekening gehouden worden.

§ 4.1 DE BEPALING VAN VLOEI PARAMETERS M.B.V. HET PROGRAMMA NCMOD

Het computerprogramma NCMOD biedt de mogelijkheid om met de ingevoerde meetwaarden van trek- en torsieproeven diverse verstevigingsmodellen door te rekenen: door de spanning, rek, reksnelheid en temperatuur in te voeren wordt een vloeicurve opgetekend (volgens een gekozen verstevigingsmodel). Bij elke vloeicurve worden de bij het gekozen verstevigingsmodel behorende parameters berekend.

De verstevigings modellen zijn:

- | | |
|-----------------------|--|
| (1) Hollomon | $\sigma_f = C \cdot \epsilon^n$ |
| (2) Krupskowsky/Swift | $\sigma_f = C \cdot (\epsilon_0 + \epsilon)^n$ |
| (3) Voce | $\sigma_f = B - (B - A) \cdot e^{-n \cdot \epsilon}$ |

De vloeiparameters worden berekend onder gebruikmaking van de kleinste kwadraten methode. De correlatie-coëfficiënt (R) is een getal dat voortkomt uit deze methode en welk een indicatie geeft over de mate van overeenstemming tussen het gekozen verstevigingsmodel en de experimentele meetwaarden.

Bij een correlatie-coëfficiënt van 1 stemt het model volledig overeen met de meetwaarden. Een lage correlatie-coëfficiënt wijst erop dat het gekozen model minder goed het vloeigedrag beschrijft.

De resultaten van de computerberekeningen staan vermeld in de bijlagen.

§ 4.1.1 CONCLUSIES UIT DE NCMOD BEREKENINGEN

In tabel 1 zijn de belangrijkste resultaten van alle NCMOD berekeningen bij elkaar gezet. Uit de correlatie-coëfficiënt blijkt dat zowel bij trek als bij torsie het verste-
vigingsmodel van Krupskowsky/Swift het beste aan de meetwaarden voldoet. De met
deze methode gevonden waarden zijn dus het meest betrouwbaar.

Dit levert op voor trek:	$n = 0.150$	s.d. = 0.017
	$C = 996.3$	s.d. = 36.1
	$\epsilon_0 = -0.0104$	s.d. = 0.0028

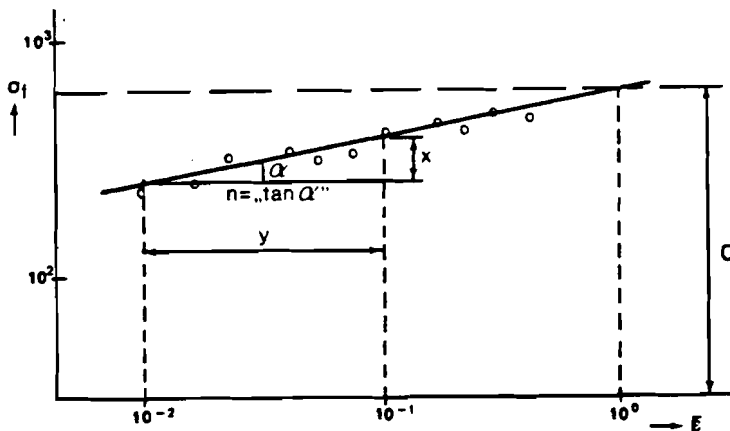
en voor torsie:	$n = 0.110$	s.d. = 0.003
	$C = 904.0$	s.d. = 13.3
	$\epsilon_0 = -0.0177$	s.d. = 0.0006

De correlatie-coëfficiënten (R) van de trekproeven zijn kleiner als die van de torsie-
proeven, omdat de meetwaarden van de torsieproeven afgelezen worden vanuit een
tijdens de proef opgetekende $M-\phi$ kromme zodat een groot aantal meetpunten op
constante onderlinge afstand mogelijk wordt. De meetpunten van de trekproef moesten
tijdens de proef handmatig gemeten worden zodat de verdeling van de meetpunten over
het meetbereik niet optimaal is. Door de relatief grote onnauwkeurigheid in het meten
van de afrondingsstraal van de insnoering treedt er een grote spreiding op in de
Bridgman gecorrigeerde waarden.

§4.2 BEPALING VAN C- EN N- WAARDEN M.B.V. HET PROGRAMMA GRAPHER

De C- en n- waarde van het materiaal kan ook op een andere manier berekend worden: door spanning en rek dubbellogaritmisch tegen elkaar uit te zetten waarbij:

- $C = \sigma_f$ voor $\epsilon = 1$ ($C =$ karakteristieke spanning)
- $n = \tan \alpha$ ($n =$ versterigings exponent)



figuur 3 bepaling van C- en n- waarde uit het dubbellogaritmisch $\sigma_f - \epsilon$ (bron:[4]).

Deze methode werkt volgens het versterigingsmodel van Hollomon: $\sigma_f = C \cdot \epsilon^n$

De resultaten van de drie trek- en torsieproeven resp.:

C45-T1B t/m T3B en C45-W1P t/m W3P werden ingevoerd in het computerprogramma GRAPHER welke de meetpunten van de trek- en torsieproeven dubbellogaritmisch uitzet (zie bijlagen) zoals in figuur 3 en de analytische formule van de (best passende) lijn door de punten geeft. Hieruit volgen direkt de C- en n- waarden, b.v.:

$$\text{C45-T1B: } \sigma_f = 1002.1 \cdot \epsilon^{0.173} \quad C = 1002.1 \text{ N/mm}^2 \quad n = 0.173$$

§ 4.2.1 CONCLUSIES UIT DE GRAPHER BEREKENINGEN

In tabel 2 zijn de berekeningen m.b.v. GRAPHER vergeleken met de berekeningen m.b.v. NCMOD. Een onderlinge vergelijking van deze methoden is alleen mogelijk voor het model van Hollomon, omdat dubbellogaritmische uitzetting van spanning tegen rek alleen een C- en n- waarde oplevert voor het exponentiële model van Hollomon, methode zie § 4.2.

Hieruit blijkt dat de C waarde m.b.v. NCMOD gemiddeld iets kleiner ($\approx 1\%$), de n waarden komen nagenoeg geheel overeen.

Het verschil in eindresultaten tussen beide methoden is als volgt te verklaren: NCMOD werkt in een $\sigma - \epsilon$ diagram; hierbij wegen afwijkingen t.o.v. het model van de eerste meetwaarden (bij een kleine ϵ) zwaarder dan afwijkingen bij een grotere ϵ . GRAPHER werkt met een $\log\sigma - \log\epsilon$ diagram, hierbij wegen afwijkingen bij grote en kleine ϵ even zwaar.

LITERATUURLIJST

- [1] Vickers hardheidsmetingen
HS Venlo stageverslag
door A.S.W.C. Pouwels
VF code: C2 WPA nr:0885

- [2] Omvormtechnologie - A
diktaat T.U. Eindhoven
prof. ir. J.A.G. Kals
dr.ir. J.H. Dautzenberg
dr.ir. J.A.H. Ramaekers
diktaatnummer 4.558

- [3] Omvormtechnologie - A
Practicumhandleiding
diktaat T.U. Eindhoven
M.Th. de Groot
ir. L.J.A. Houtackers
diktaatnummer 4.557

- [4] Prüfung des plastisches Verhaltens metallischer Werkstoffe in
Torsionsversuchen
K. Pöhlandt, 1983
Publicatie in: Z. Werkstofftechnik 14, pag 181 - 189

- [5] Plastisch bewerken van metalen
dr. ir. J.A.H. Ramaekers,
ir. L.J.A. Houtackers,
ir. P.G.B. Peeters
ISBN 90-6808-007-5

BIJLAGEN

**VLOEIPARAMETERS BEREKEND MET HET
PROGRAMMA NCMOD**

1) Hollomon ($\sigma = C \cdot \varepsilon^n$)

	C	n	R
C45-T1B	996.0	0.170	0.99392
C45-T2B	1052.9	0.188	0.98549
C45-T3B	994.5	0.158	0.98671
C45-W1P	901.7	0.125	0.99203
C45-W2P	927.3	0.132	0.98995
C45-W3P	904.9	0.129	0.99031

2) Krupskowsky / Swift ($\sigma_f = C \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$)

	C	ε_0	n	R
C45-T1B	979.6	-0.0076	0.153	0.99616
C45-T2B	1037.8	-0.0104	0.165	0.99510
C45-T3B	971.6	-0.0132	0.132	0.99666
C45-W1P	894.2	-0.0172	0.107	0.99951
C45-W2P	919.2	-0.0184	0.112	0.99954
C45-W3P	898.7	-0.0176	0.110	0.99921

3) Voce ($\sigma_f = B - (B - A)^{(-n\varepsilon)}$)

	B	A	n	R
C45-T1B	906.0	485.3	5.575	0.97853
C45-T2B	934.3	363.7	10.682	0.99007
C45-T3B	873.8	438.0	10.474	0.98156
C45-W1P	871.5	434.4	4.863	0.98240
C45-W2P	892.2	522.5	5.143	0.98358
C45-W3P	875.7	520.2	4.983	0.98243

TABEL 2

**VERGELIJKING VAN DE NCMOD EN
GRAPHER BEREKENINGEN**

PROEF	MODEL	NCMOD:		GRAPHER:	
		n	C	n	C
C45-T1B	Hollomon	0.170	996.0	0.173	1002.1
C45-T2B	Hollomon	0.188	1052.9	0.198	1078.7
C45-T3B	Hollomon	0.158	994.5	0.164	1008.0
C45-W1P	Hollomon	0.125	901.7	0.129	905.8
C45-W2P	Hollomon	0.132	927.3	0.137	923.3
C45-W3P	Hollomon	0.129	904.9	0.133	909.2

```

*****
*
*   Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic
*   material constants
*
*****

```

Date: 13-05-1990
Time: 05:50

```

Material: C45-T1B
Model   :  $\sigma = C * \epsilon^n$           (Hollomon)          (1)

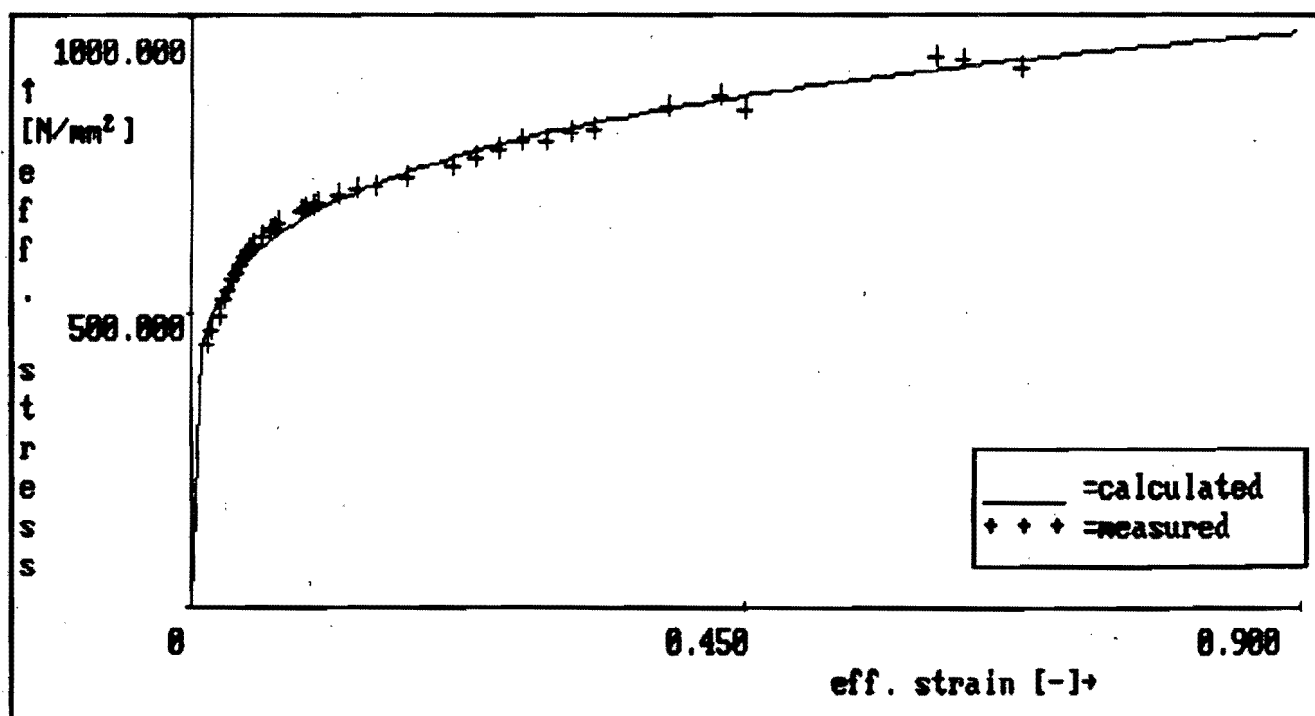
Temperature      :          20.00000   [°C]
Strain-rate      :          0.01000   [1/s]

Strain hardening exponent n :          0.17026   [-]
Characteristic stress C     :          996.00672   [N/mm²]

Correlation coefficient R   :          0.9939170   [-]
Residual sum squared RSS   :          7219.685   [N/mm²]
Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr      : -
source (literature) : -
test              : tensile

```



```

*****
*
*   Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic
*   material constants
*
*****

```

Date: 11-05-1990
Time: 21:50

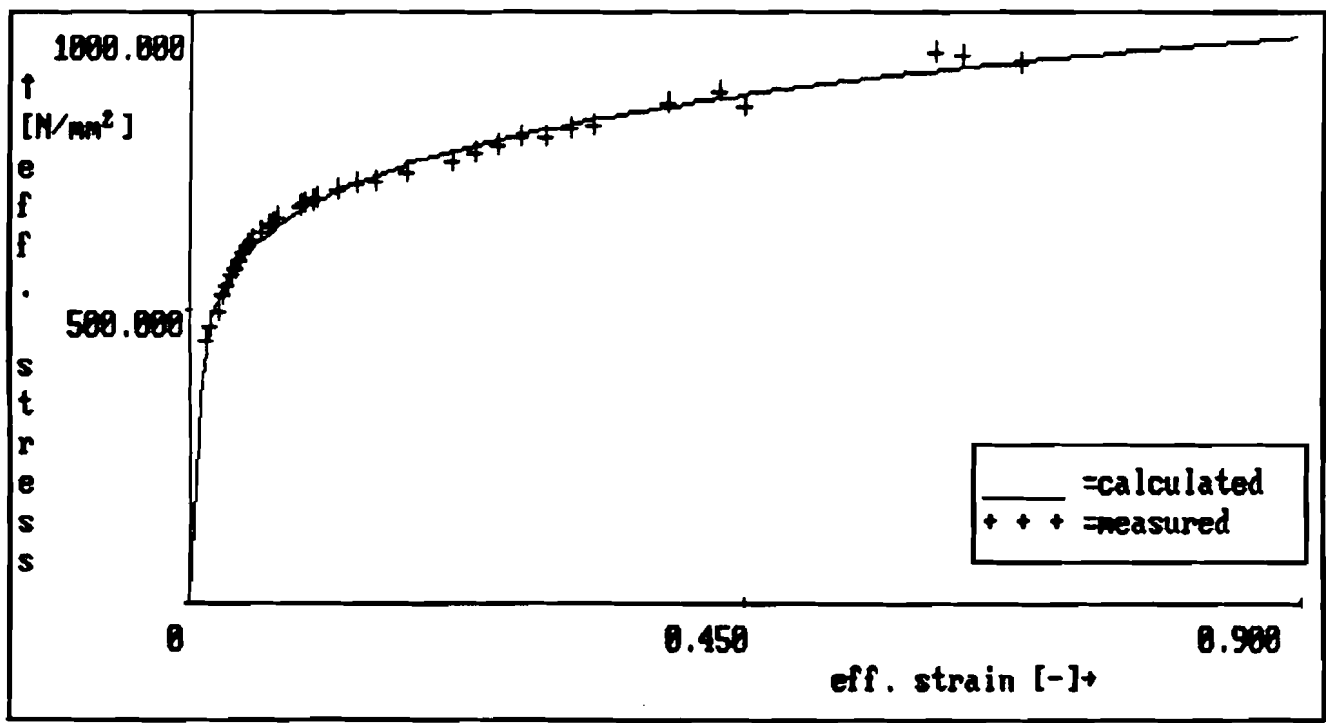
Material: C45-T1B
Model : $\sigma=C*(\epsilon_0+\epsilon)^n$ (Krupskowsky/Swift) (2)

Temperature : 20.00000 [°C]
Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Strain hardening exponent n : 0.15346 [-]
Characteristic stress C : 979.63584 [N/mm²]
Pre strain eps0 : -0.00760 [-]

Correlation coefficient R : 0.9961625 [-]
Residual sum squared RSS : 4559.714 [N/mm²]
Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr : -
source (literature) : -
test : tensile



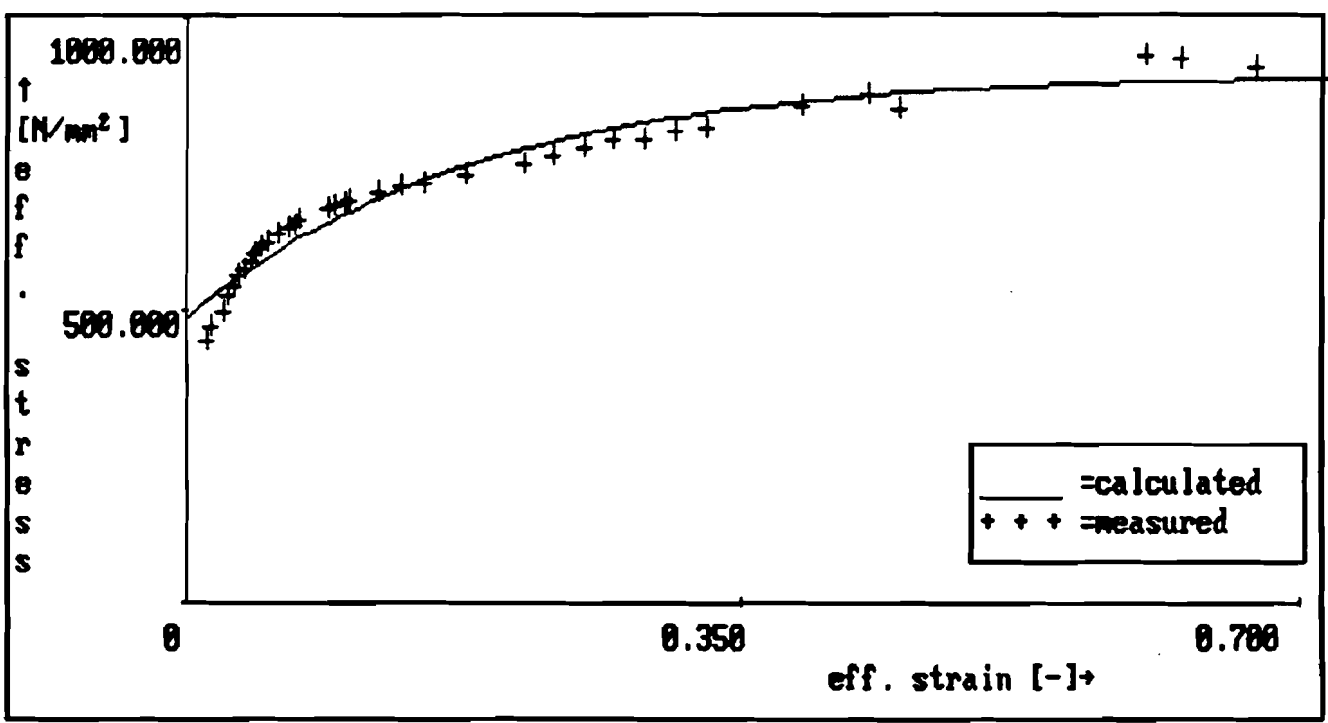
 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

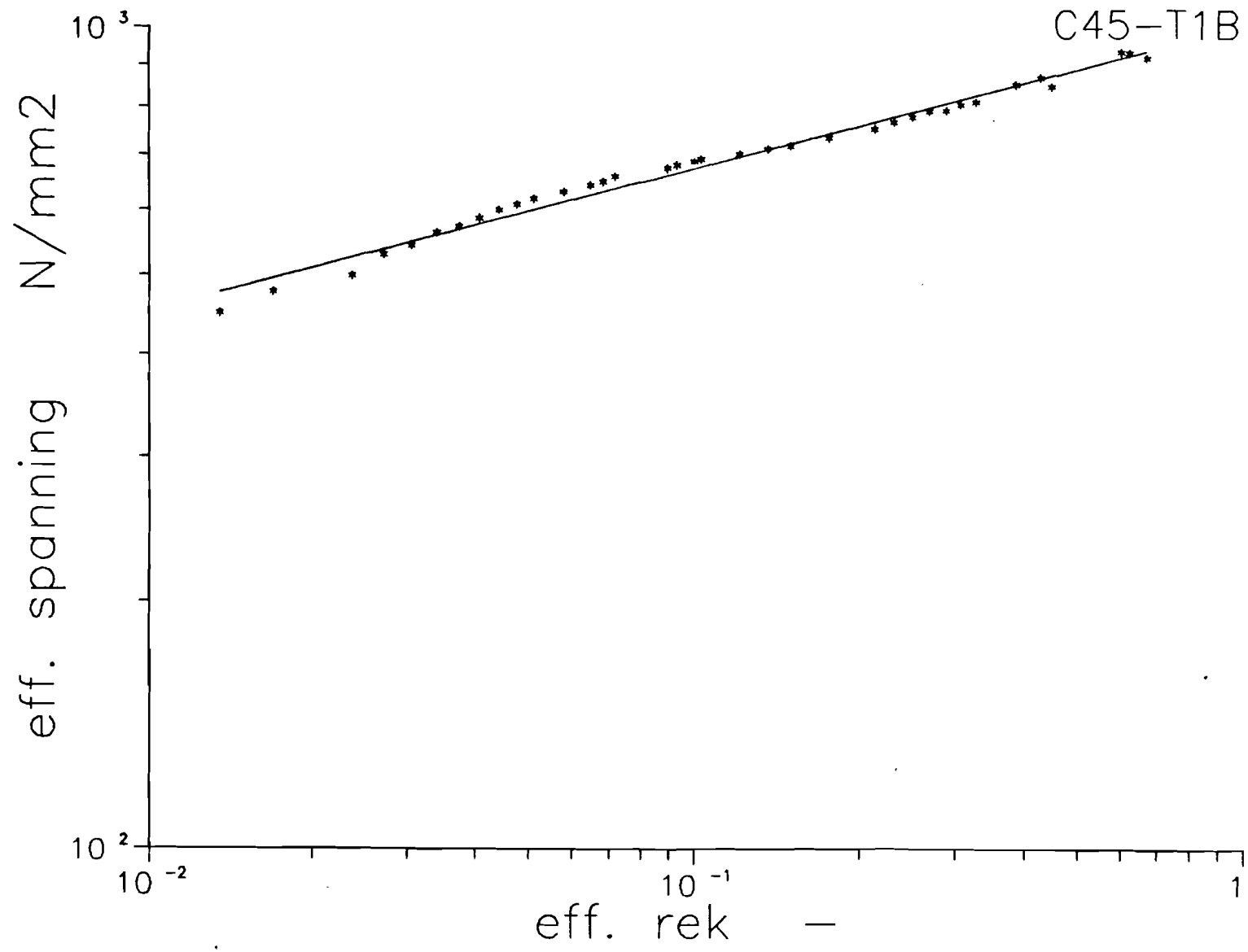
Date: 11-05-1990
 Time: 21:53

Material: C45-T1B
 Model : $\sigma = B - (B - A) \exp(-n\varepsilon)$ (Voce) (4)
 Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]
 Factor n : 5.57520 [-]
 Factor A : 485.32033 [N/mm²]
 Factor B : 905.96882 [N/mm²]

Correlation coefficient R : 0.9785285 [-]
 Residual sum squared RSS : 25287.098 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr : -
 source (literature) : -
 test : tensile





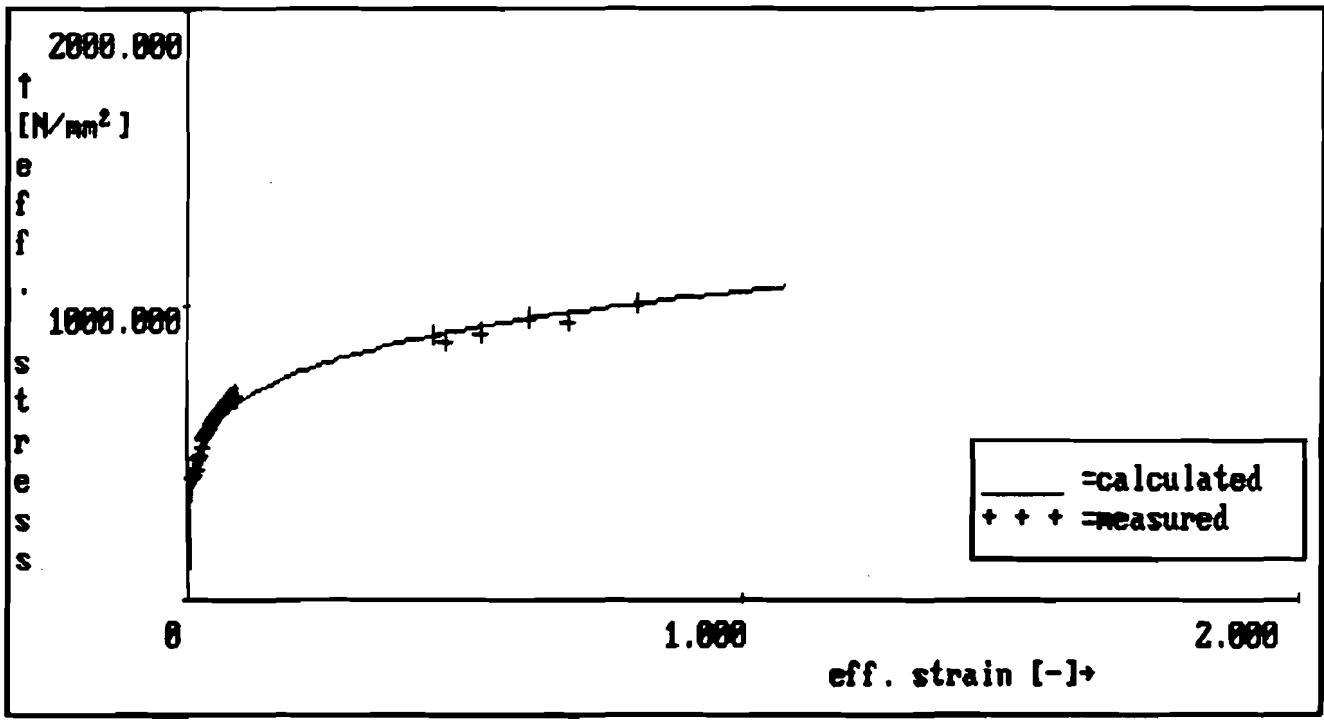
1-05-1990 21:44
Data of material C45-T1B

no	strain-rate	temperature	eff. strain	eff. stress
0	0.01	20.00	0.0135	448.40
1	0.01	20.00	0.0169	475.50
2	0.01	20.00	0.0237	497.20
3	0.01	20.00	0.0271	528.40
4	0.01	20.00	0.0305	541.30
5	0.01	20.00	0.0339	561.80
6	0.01	20.00	0.0373	571.20
7	0.01	20.00	0.0407	584.40
8	0.01	20.00	0.0442	597.70
9	0.01	20.00	0.0476	607.30
10	0.01	20.00	0.0511	616.90
11	0.01	20.00	0.0580	628.80
12	0.01	20.00	0.0649	640.90
13	0.01	20.00	0.0684	647.00
14	0.01	20.00	0.0719	657.00
15	0.01	20.00	0.0894	672.50
16	0.01	20.00	0.0929	678.80
17	0.01	20.00	0.0999	685.60
18	0.01	20.00	0.1030	690.00
19	0.01	20.00	0.1210	700.40
20	0.01	20.00	0.1360	710.50
21	0.01	20.00	0.1500	716.60
22	0.01	20.00	0.1760	733.00
23	0.01	20.00	0.2130	751.80
24	0.01	20.00	0.2310	766.00
25	0.01	20.00	0.2500	778.40
26	0.01	20.00	0.2690	791.10
27	0.01	20.00	0.2890	792.10
28	0.01	20.00	0.3080	805.30
29	0.01	20.00	0.3280	811.30
30	0.01	20.00	0.3880	851.10
31	0.01	20.00	0.4300	867.60
32	0.01	20.00	0.4500	846.30
33	0.01	20.00	0.6040	933.60
34	0.01	20.00	0.6260	931.50
35	0.01	20.00	0.6730	917.20

 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 18-04-1990
 Time: 23:42

Material: C45-T2B
 Model : $\sigma = C \cdot \epsilon^n$ (Hollomon) (1)
 Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]
 Strain hardening exponent n : 0.18772 [-]
 Characteristic stress C : 1052.87392 [N/mm²]
 Correlation coefficient R : 0.9854928 [-]
 Residual sum squared RSS : 21221.529 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach
 werkstoff-nr :
 source (literature) : --
 test : tensile



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 21:56

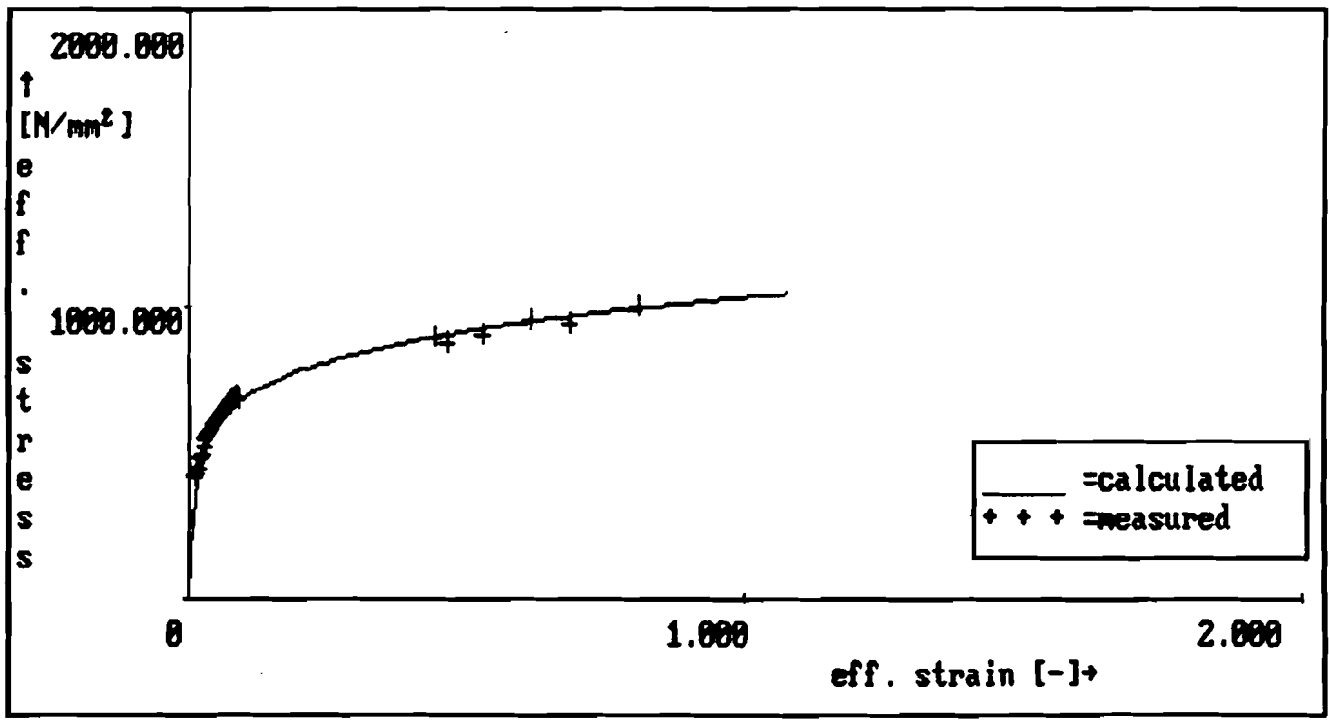
Material: C45-T2B
 Model : $\sigma=C*(\epsilon_0+\epsilon)^n$ (Krupskowsky/Swift) (2)

Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Strain hardening exponent n : 0.16529 [-]
 Characteristic stress C : 1037.7525 [N/mm²]
 Pre strain eps0 : -0.01040 [-]

Correlation coefficient R : 0.9950975 [-]
 Residual sum squared RSS : 7361.542 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : --
 test : tensile



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 21:59

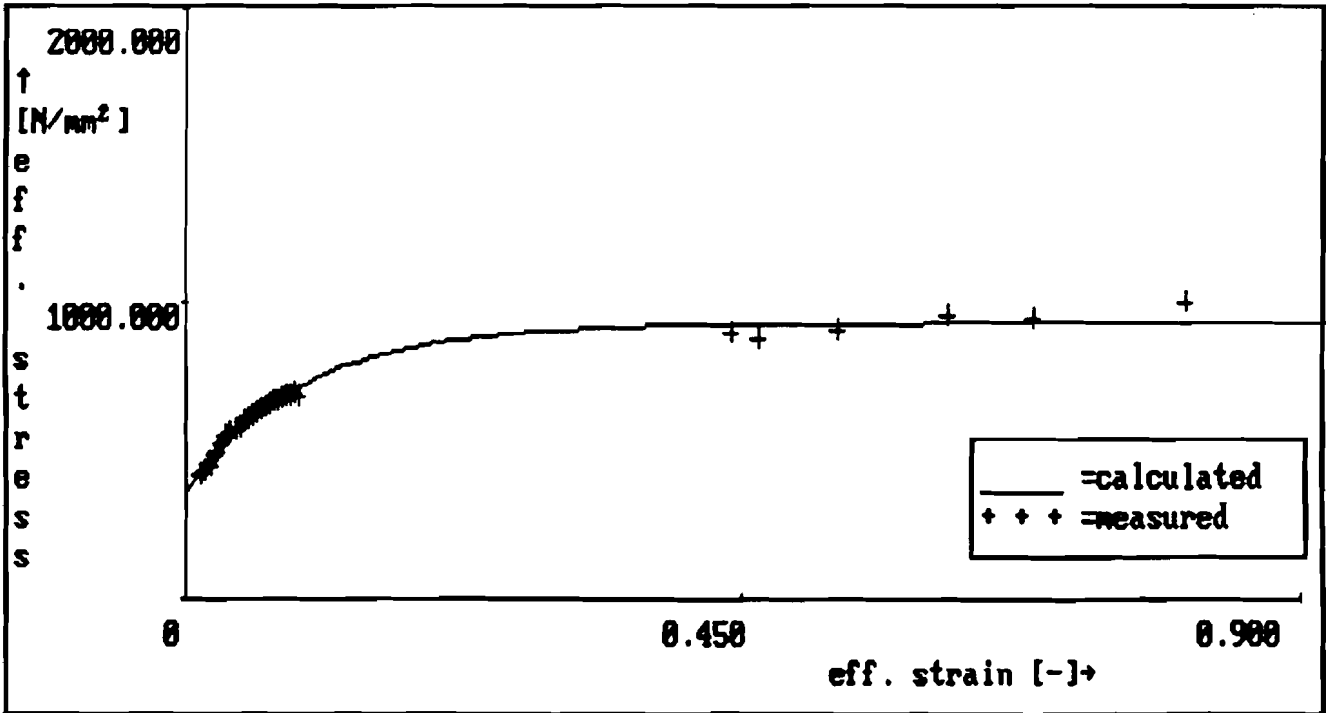
Material: C45-T2B
 Model : $\sigma = B - (B - A) \exp(-n\varepsilon)$ (Voce) (4)

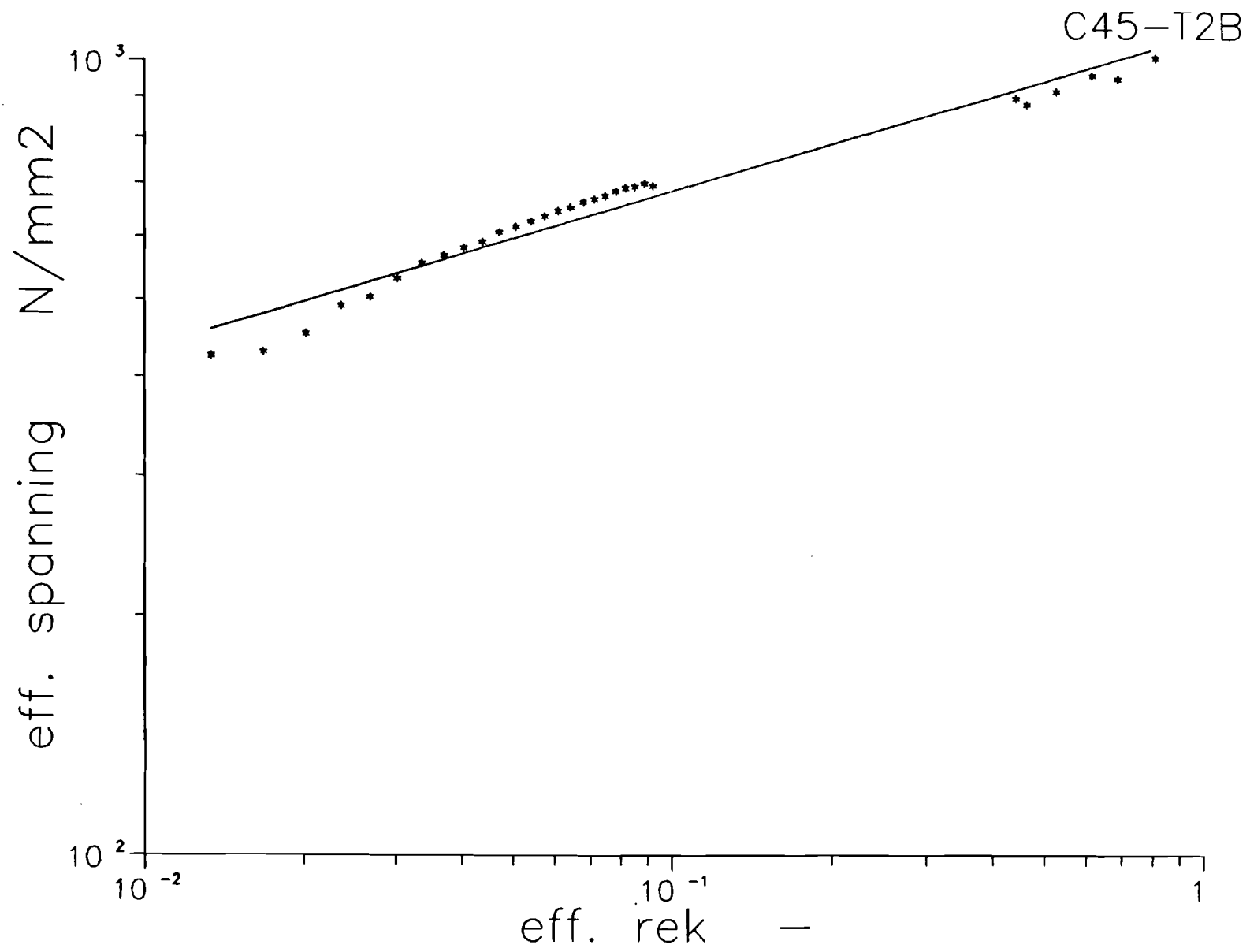
Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Factor n : 10.68240 [-]
 Factor A : 363.67122 [N/mm²]
 Factor B : 934.25367 [N/mm²]

Correlation coefficient R : 0.9900684 [-]
 Residual sum squared RSS : 14561.617 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : --
 test : tensile





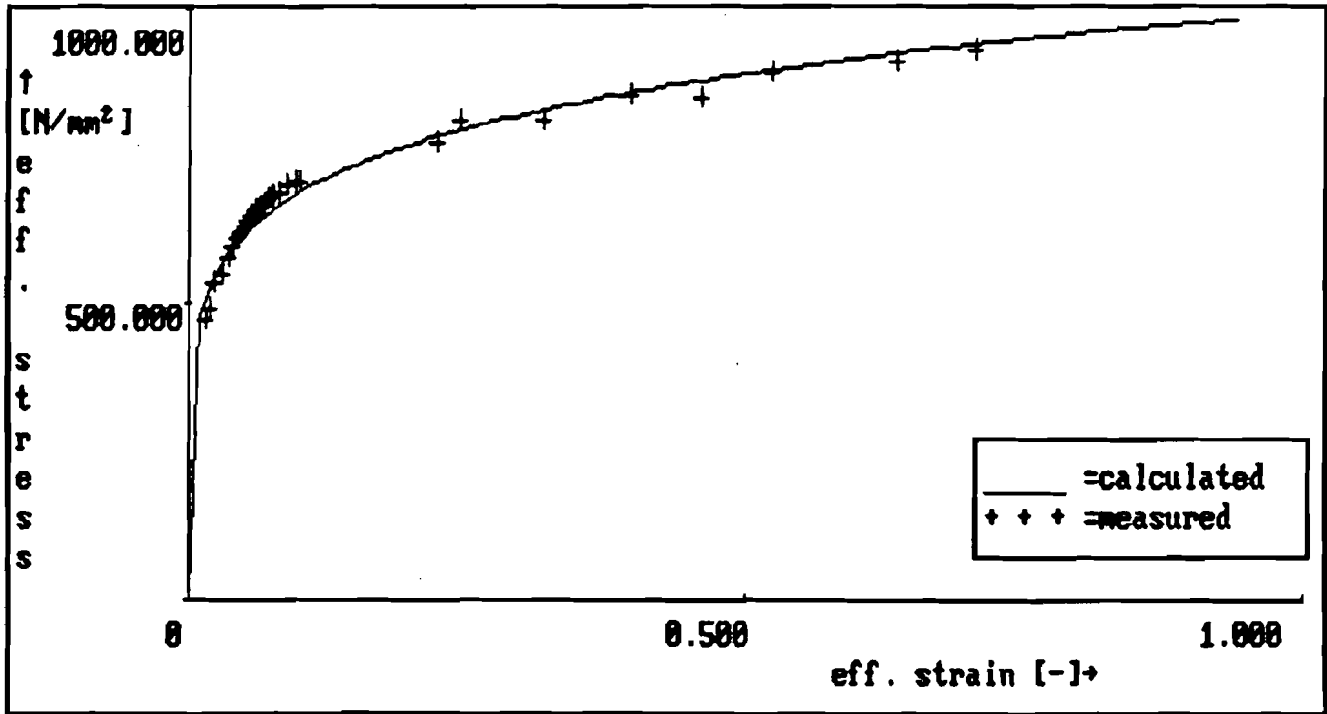
1-05-1990 21:45
ata of material C45-T2B

no	strain-rate	temperature	eff. strain	eff. stress
0	0.01	20.00	0.0134	424.40
1	0.01	20.00	0.0168	429.40
2	0.01	20.00	0.0202	452.60
3	0.01	20.00	0.0236	490.50
4	0.01	20.00	0.0268	503.10
5	0.01	20.00	0.0302	530.40
6	0.01	20.00	0.0336	554.20
7	0.01	20.00	0.0370	567.10
8	0.01	20.00	0.0404	580.10
9	0.01	20.00	0.0438	589.50
10	0.01	20.00	0.0472	606.40
11	0.01	20.00	0.0508	616.00
12	0.01	20.00	0.0542	625.60
13	0.01	20.00	0.0576	635.20
14	0.01	20.00	0.0610	645.00
15	0.01	20.00	0.0644	651.00
16	0.01	20.00	0.0680	660.80
17	0.01	20.00	0.0714	666.90
18	0.01	20.00	0.0748	673.10
19	0.01	20.00	0.0784	683.10
20	0.01	20.00	0.0818	689.30
21	0.01	20.00	0.0852	691.70
22	0.01	20.00	0.0888	698.00
23	0.01	20.00	0.0922	692.70
24	0.01	20.00	0.4420	895.90
25	0.01	20.00	0.4640	879.40
26	0.01	20.00	0.5280	912.70
27	0.01	20.00	0.6160	956.10
28	0.01	20.00	0.6860	946.10
29	0.01	20.00	0.8080	1005.70

 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 10-05-1990
 Time: 16:44

Material: C45-T3B
 Model : $\sigma=C*\epsilon^n$ (Hollomon) (1)
 Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]
 Strain hardening exponent n : 0.15782 [-]
 Characteristic stress C : 994.53195 [N/mm²]
 Correlation coefficient R : 0.9867083 [-]
 Residual sum squared RSS : 11662.107 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach
 werkstoff-nr :
 source (literature) : --
 test : tensile



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 10-05-1990
 Time: 16:48

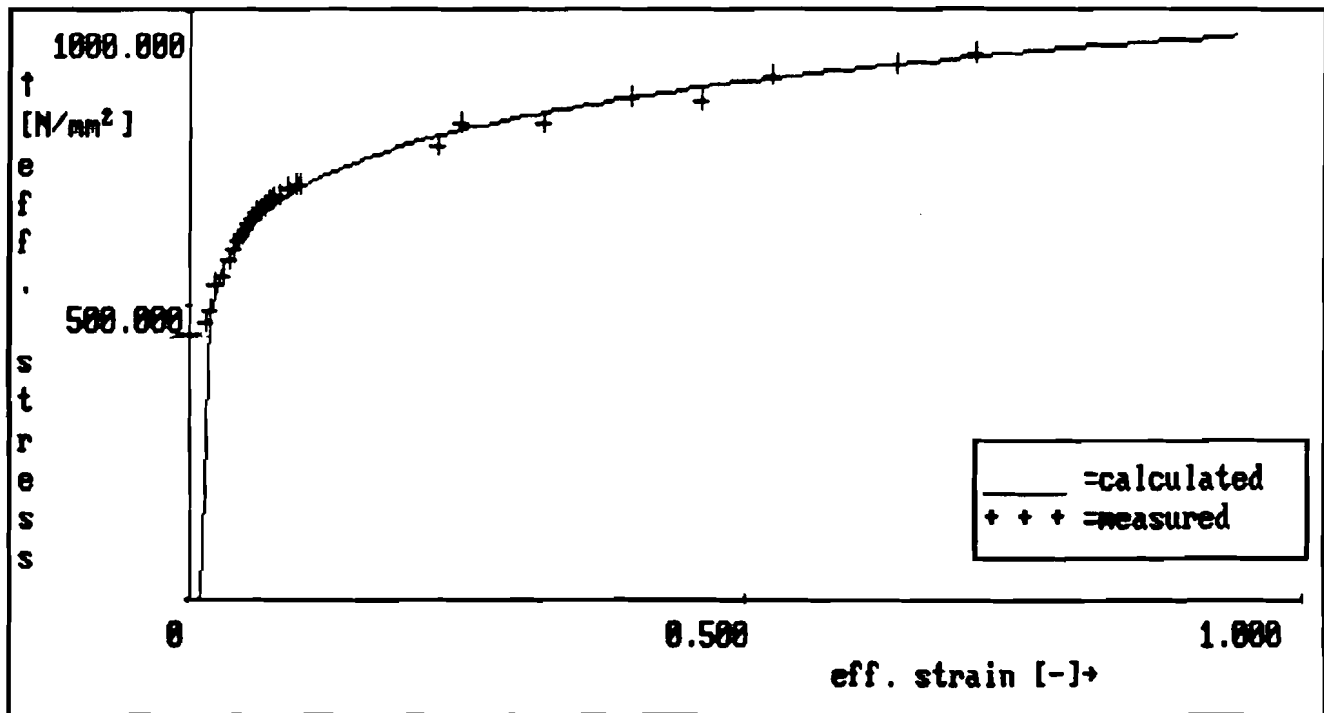
Material: C45-T3B
 Model : $\sigma = C * (\epsilon_0 - \epsilon)^\eta$ (Krupskowsky/Swift) (2)

Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Strain hardening exponent n : 0.13219 [-]
 Characteristic stress C : 971.56564 [N/mm²]
 Pre strain eps0 : -0.01320 [-]

Correlation coefficient R : 0.9966594 [-]
 Residual sum squared RSS : 2954.463 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : --
 test : tensile



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 10-05-1990
 Time: 16:52

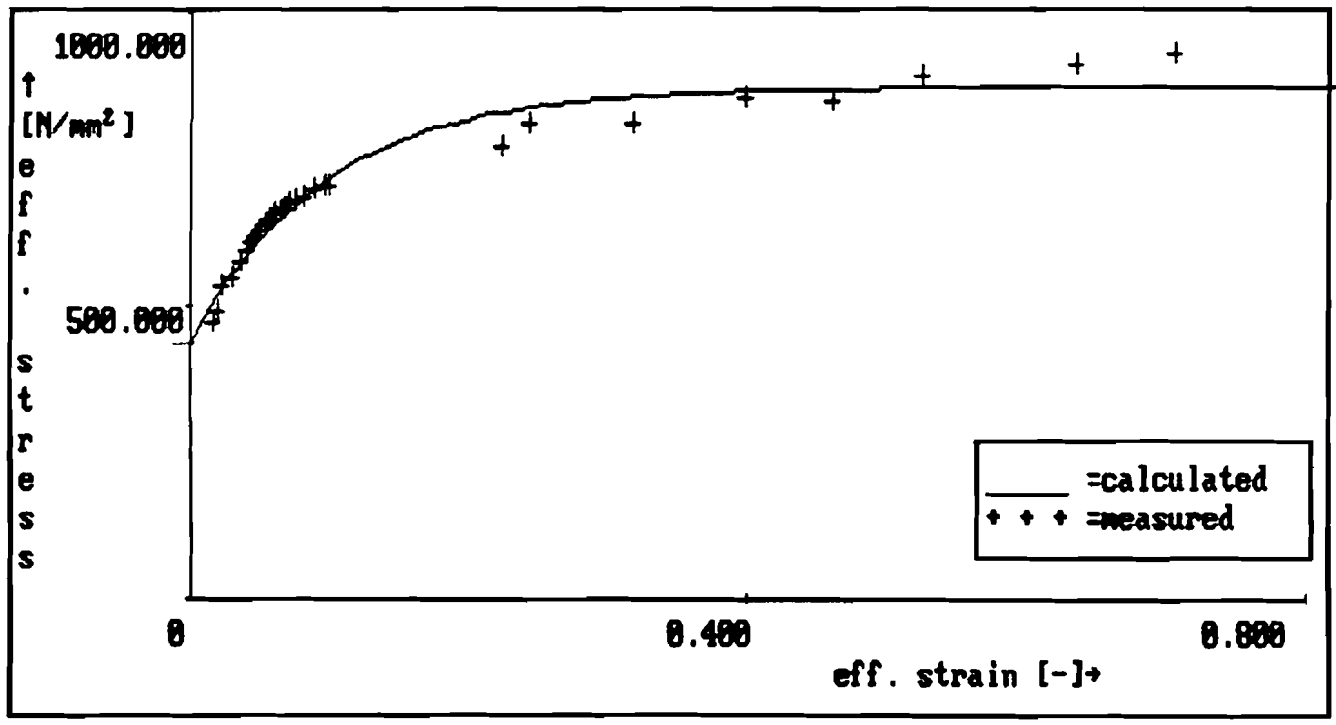
Material: C45-T3B
 Model : $\sigma = B - (B - A) \exp(-n\varepsilon)$ (Voce) (4)

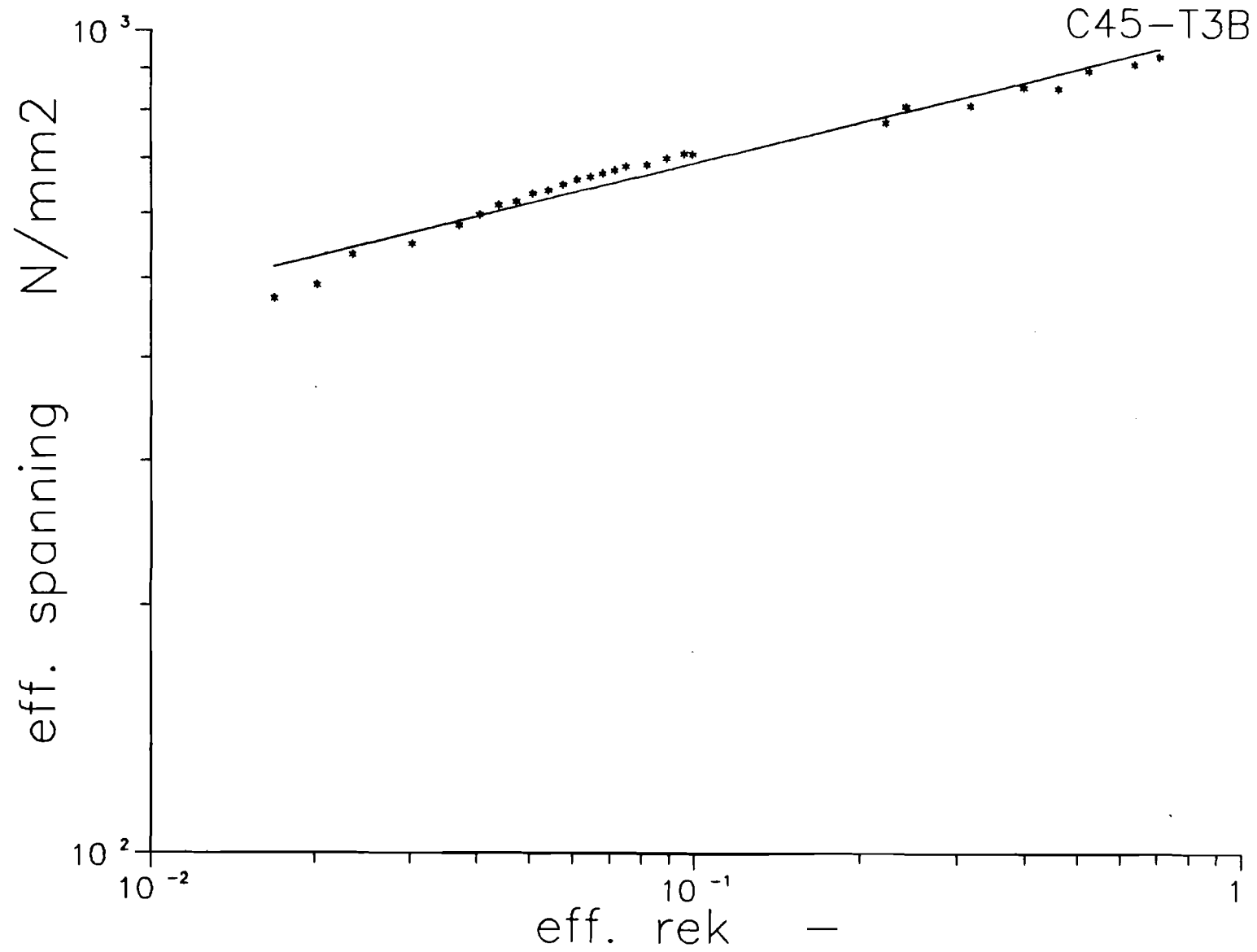
Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Factor n : 10.47440 [-]
 Factor A : 437.97162 [N/mm²]
 Factor B : 873.76894 [N/mm²]

Correlation coefficient R : 0.9815598 [-]
 Residual sum squared RSS : 16137.400 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : --
 test : tensile





1-05-1990 21:46
ata of material C45-T3B

no	strain-rate	temperature	eff. strain	eff. stress
0	0.01	20.00	0.0168	472.30
1	0.01	20.00	0.0202	490.50
2	0.01	20.00	0.0235	534.20
3	0.01	20.00	0.0303	550.50
4	0.01	20.00	0.0371	580.10
5	0.01	20.00	0.0371	580.10
6	0.01	20.00	0.0405	597.00
7	0.01	20.00	0.0440	613.90
8	0.01	20.00	0.0474	619.70
9	0.01	20.00	0.0508	633.10
10	0.01	20.00	0.0542	639.00
11	0.01	20.00	0.0577	648.80
12	0.01	20.00	0.0611	658.60
13	0.01	20.00	0.0646	664.60
14	0.01	20.00	0.0680	670.80
15	0.01	20.00	0.0715	676.90
16	0.01	20.00	0.0750	684.30
17	0.01	20.00	0.0819	687.90
18	0.01	20.00	0.0889	700.50
19	0.01	20.00	0.0959	709.30
20	0.01	20.00	0.0994	707.90
21	0.01	20.00	0.2230	774.00
22	0.01	20.00	0.2430	809.90
23	0.01	20.00	0.3180	812.50
24	0.01	20.00	0.3980	855.30
25	0.01	20.00	0.4610	852.20
26	0.01	20.00	0.5250	894.60
27	0.01	20.00	0.6360	911.40
28	0.01	20.00	0.7070	931.30

 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 22:02

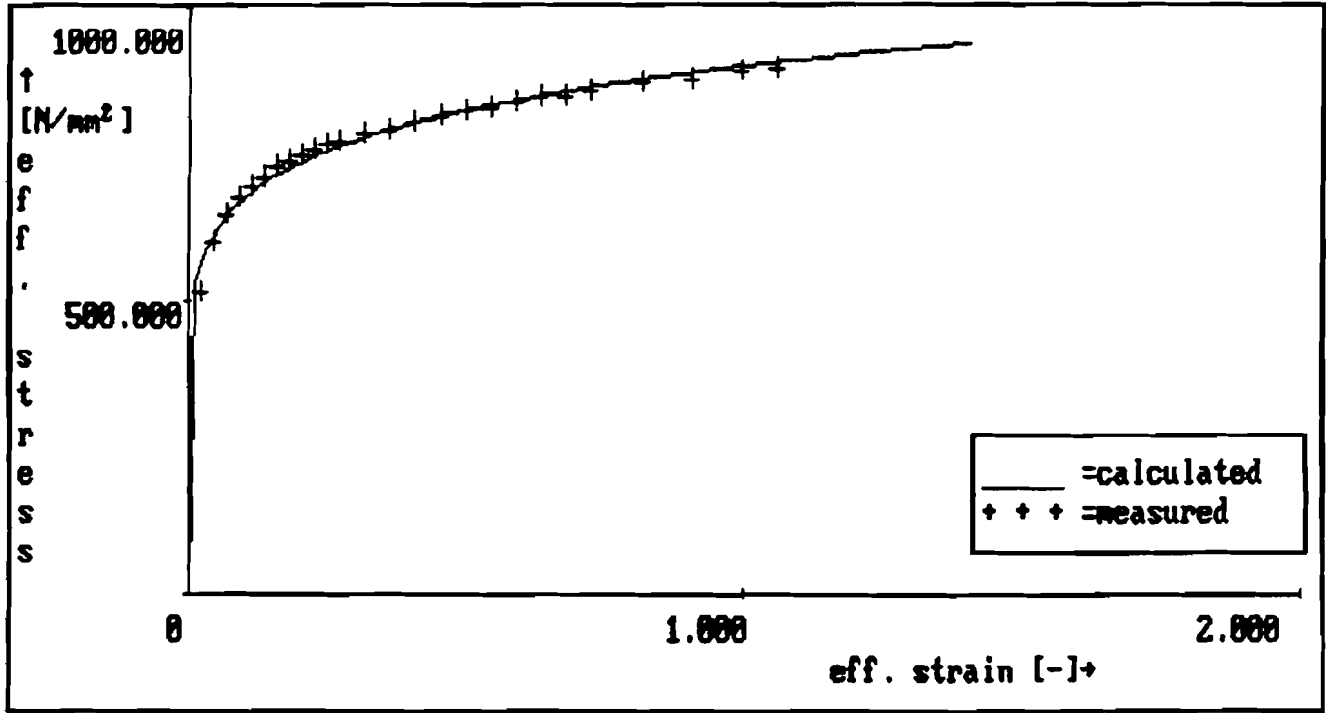
Material: C45-W1P
 Model : $\sigma = C * \epsilon^n$ (Hollomon) (1)

Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Strain hardening exponent n : 0.12487 [-]
 Characteristic stress C : 901.72325 [N/mm²]

Correlation coefficient R : 0.9920328 [-]
 Residual sum squared RSS : 3855.131 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : -
 test : torsion



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 22:09

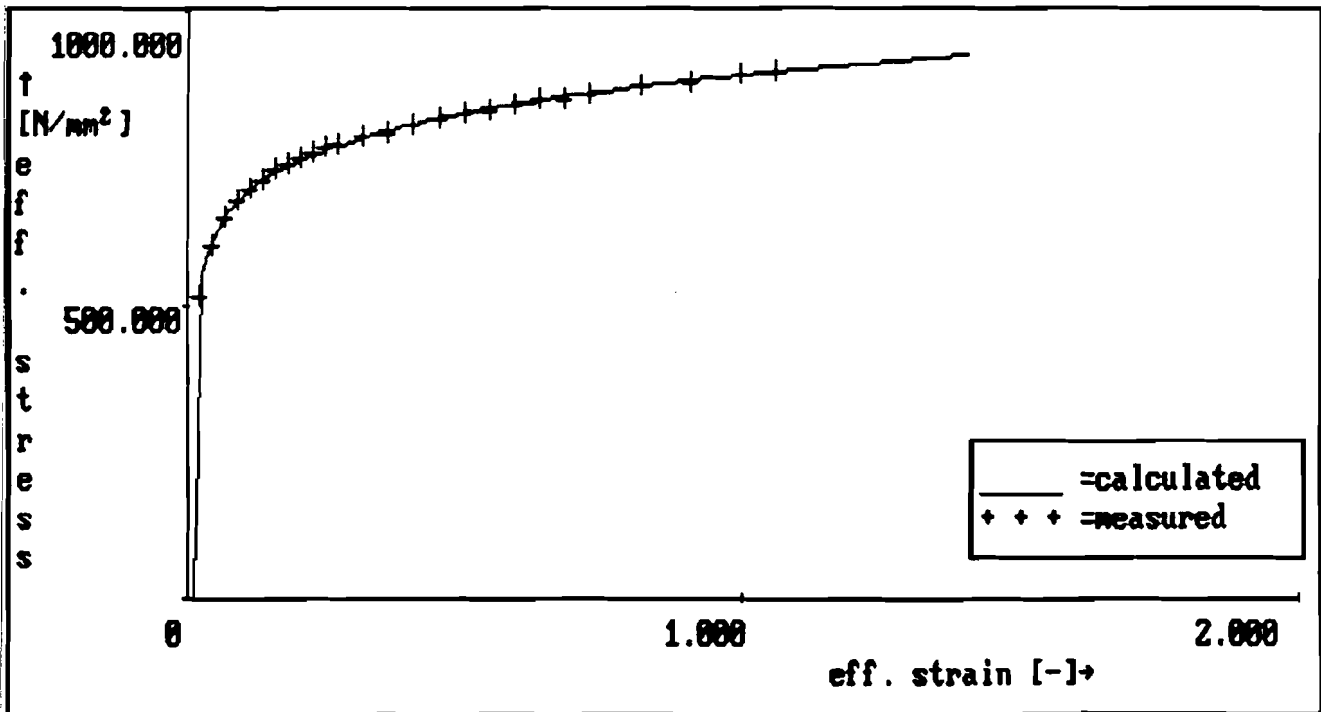
Material: C45-W1P
 Model : $\sigma=C*(\epsilon_0+\epsilon)^n$ (Krupskowsky/Swift) (2)

Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Strain hardening exponent n : 0.10672 [-]
 Characteristic stress C : 894.18194 [N/mm²]
 Pre strain eps0 : -0.01720 [-]

Correlation coefficient R : 0.9995071 [-]
 Residual sum squared RSS : 240.388 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : -
 test : torsion



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 22:12

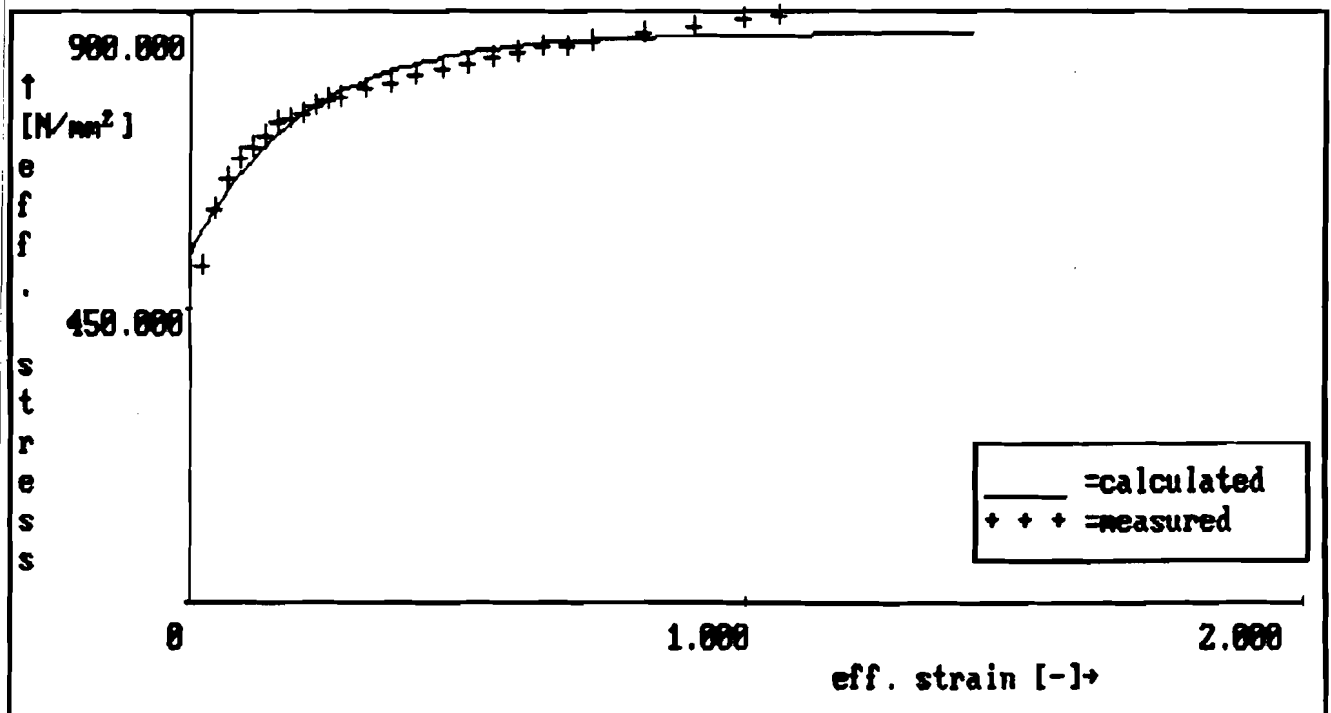
Material: C45-W1P
 Model : $\sigma = B - (B - A) \exp(-n\epsilon)$ (Voce) (4)

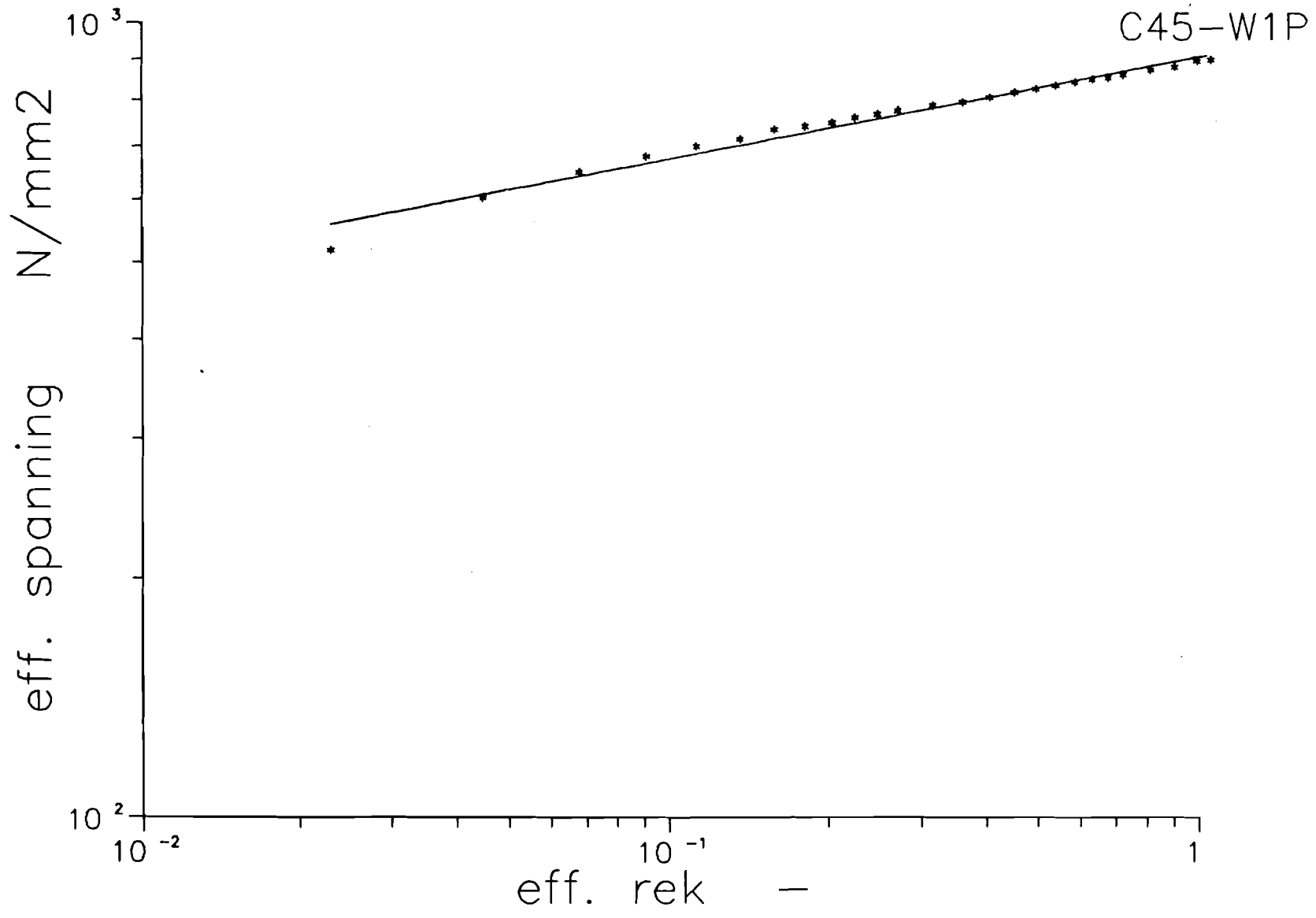
Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Factor n : 4.86320 [-]
 Factor A : 534.41150 [N/mm²]
 Factor B : 871.46332 [N/mm²]

Correlation coefficient R : 0.9824010 [-]
 Residual sum squared RSS : 8474.532 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : -
 test : torsion





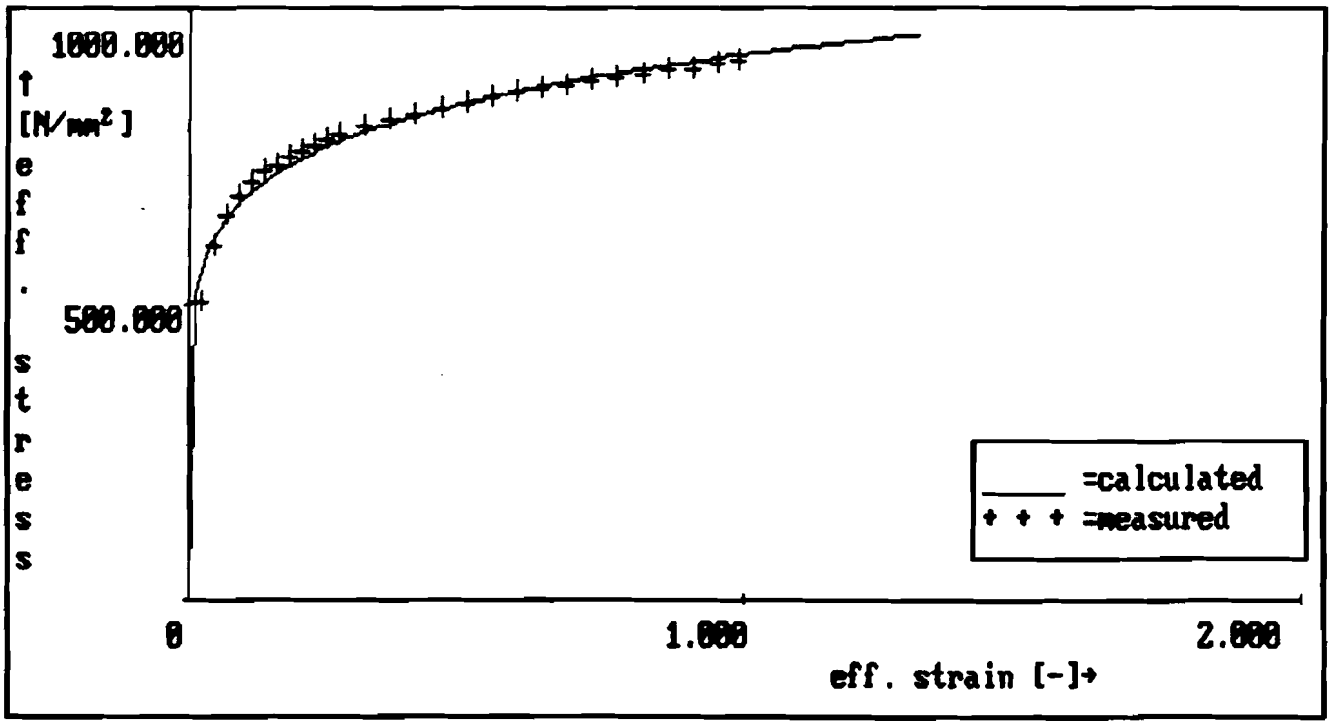
-05-1990 00:40
ata of material C45-W1P

no	strain-rate	temperature	eff. strain	eff. stress
0	0.01	20.00	0.0230	516.90
1	0.01	20.00	0.0450	601.80
2	0.01	20.00	0.0680	648.10
3	0.01	20.00	0.0910	679.00
4	0.01	20.00	0.1130	698.20
5	0.01	20.00	0.1360	713.70
6	0.01	20.00	0.1580	733.00
7	0.01	20.00	0.1810	740.70
8	0.01	20.00	0.2040	748.40
9	0.01	20.00	0.2260	760.00
10	0.01	20.00	0.2490	767.70
11	0.01	20.00	0.2720	775.40
12	0.01	20.00	0.3170	787.00
13	0.01	20.00	0.3620	794.70
14	0.01	20.00	0.4070	806.30
15	0.01	20.00	0.4530	817.80
16	0.01	20.00	0.4980	825.50
17	0.01	20.00	0.5430	833.30
18	0.01	20.00	0.5880	841.00
19	0.01	20.00	0.6340	848.70
20	0.01	20.00	0.6790	852.30
21	0.01	20.00	0.7240	860.30
22	0.01	20.00	0.8150	871.80
23	0.01	20.00	0.9050	879.60
24	0.01	20.00	0.9960	895.00
25	0.01	20.00	1.0590	898.80

 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 10:29

Material: C45-W2P
 Model : $\sigma=C*\epsilon^n$ (Hollomon) (1)
 Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]
 Strain hardening exponent n : 0.13207 [-]
 Characteristic stress C : 927.30447 [N/mm²]
 Correlation coefficient R : 0.9899504 [-]
 Residual sum squared RSS : 5942.736 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach
 werkstoff-nr :
 source (literature) : -
 test : torsion



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 22:15

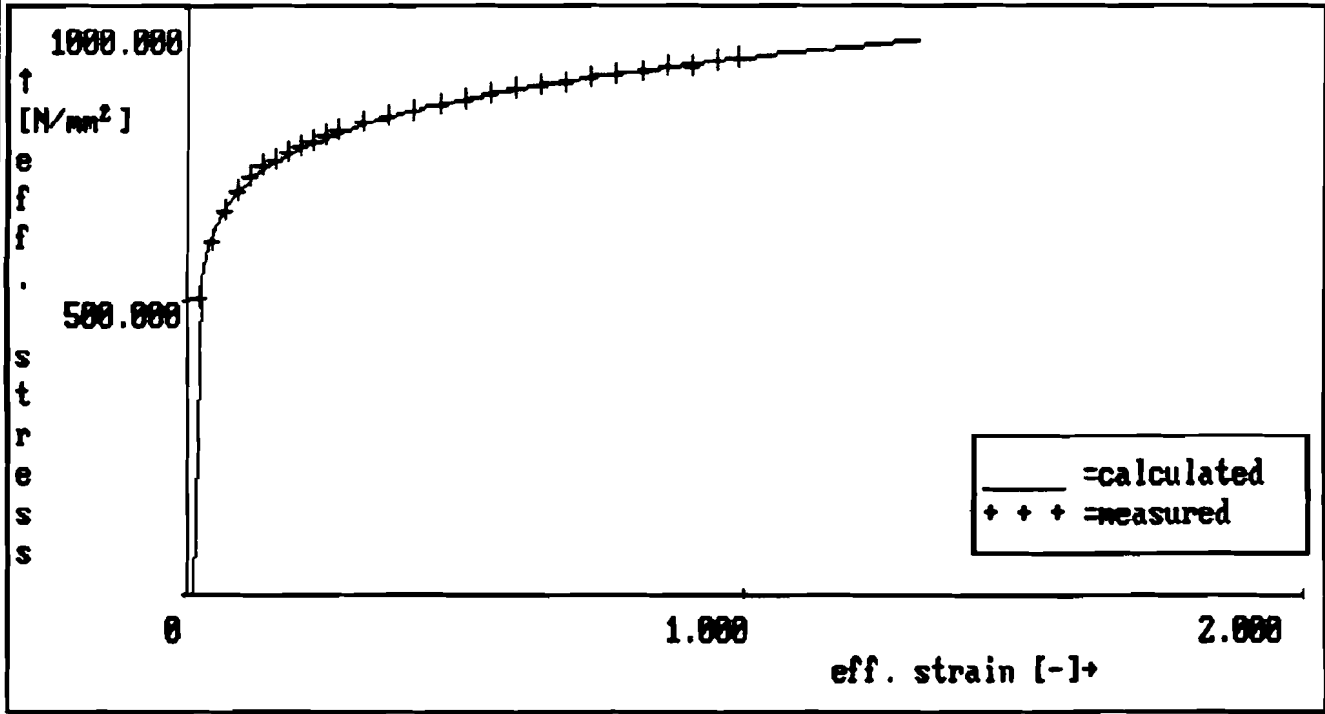
Material: C45-W2P
 Model : $\sigma = C * (\epsilon_0 + \epsilon)^\eta$ (Krupskowsky/Swift) (2)

Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Strain hardening exponent n : 0.11154 [-]
 Characteristic stress C : 919.23834 [N/mm²]
 Pre strain eps0 : -0.01840 [-]

Correlation coefficient R : 0.9995416 [-]
 Residual sum squared RSS : 274.986 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
 source (literature) : -
 test : torsion



```

*****
*
*   Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic
*   material constants
*
*****

```

Date: 11-05-1990
Time: 22:18

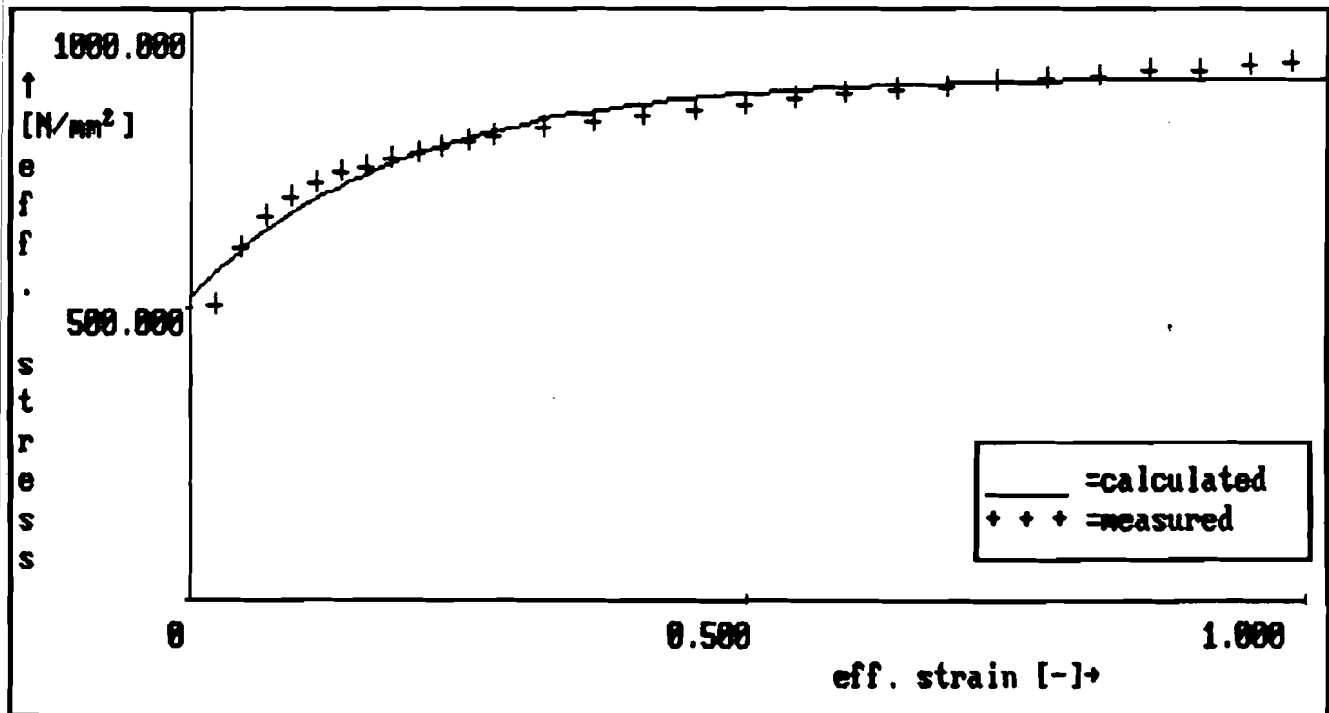
Material: C45-W2P
Model : $\sigma = B - (B - A) \exp(-n\varepsilon)$ (Voce) (4)

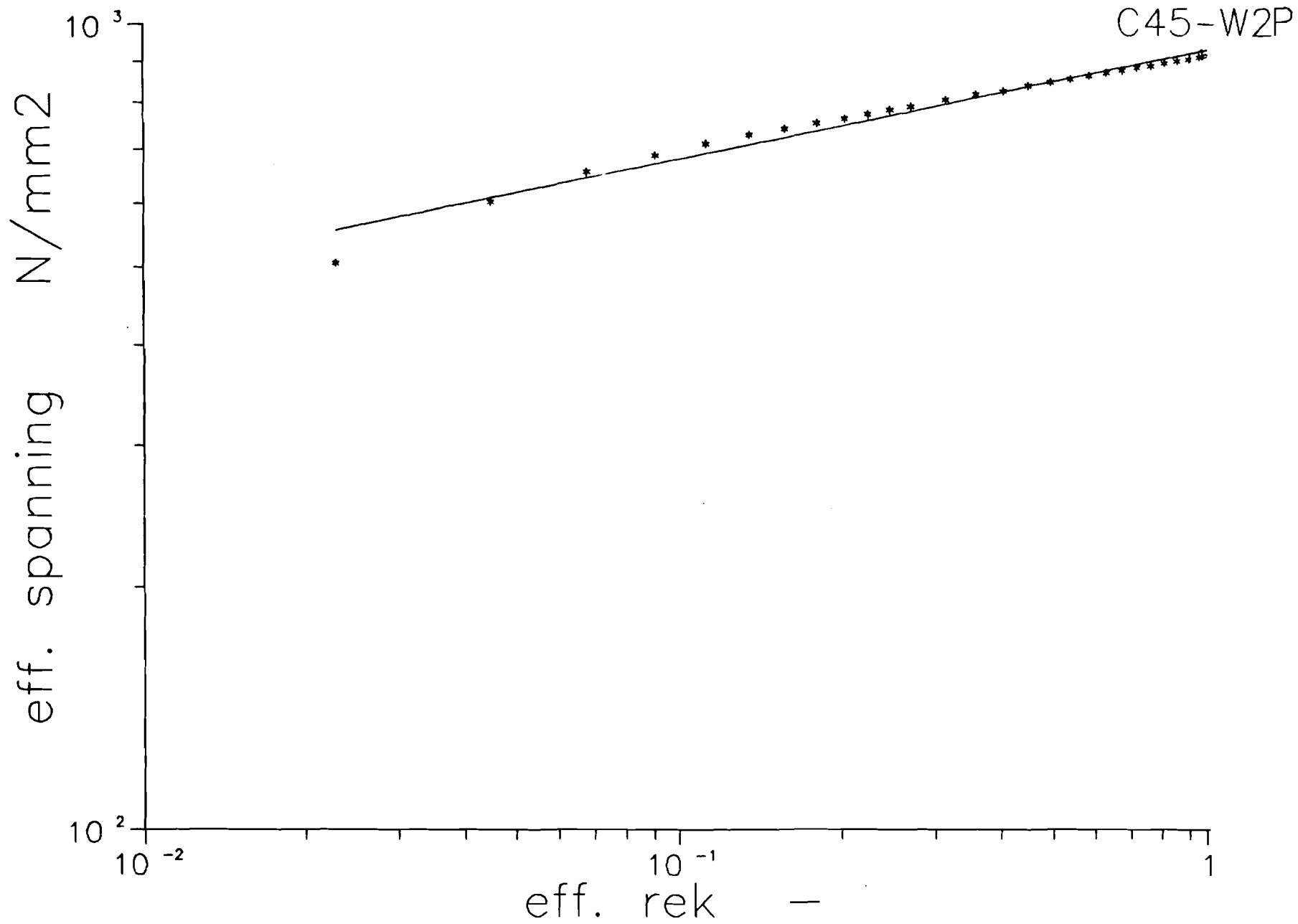
Temperature : 20.00000 [°C]
Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Factor n : 5.14320 [-]
Factor A : 522.50337 [N/mm²]
Factor B : 892.23238 [N/mm²]

Correlation coefficient R : 0.9835823 [-]
Residual sum squared RSS : 9677.351 [N/mm²]
Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr :
source (literature) : -
test : torsion





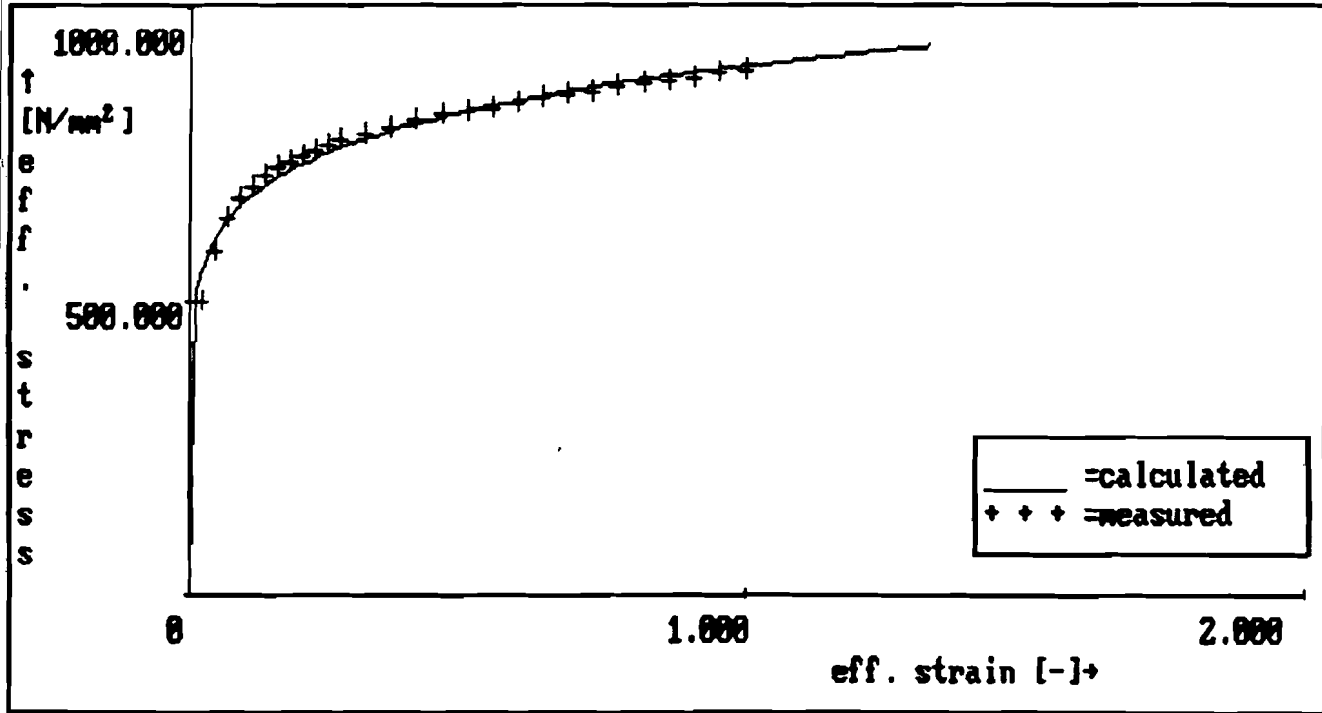
-05-1990 11:04
ata of material C45-W2P

no	strain-rate	temperature	eff. strain	eff. stress
0	0.01	20.00	0.0230	505.40
1	0.01	20.00	0.0450	601.80
2	0.01	20.00	0.0680	655.80
3	0.01	20.00	0.0910	686.70
4	0.01	20.00	0.1130	709.80
5	0.01	20.00	0.1360	729.10
6	0.01	20.00	0.1580	742.60
7	0.01	20.00	0.1810	754.20
8	0.01	20.00	0.2040	763.80
9	0.01	20.00	0.2260	773.80
10	0.01	20.00	0.2490	783.10
11	0.01	20.00	0.2720	790.80
12	0.01	20.00	0.3170	806.30
13	0.01	20.00	0.3620	817.80
14	0.01	20.00	0.4070	825.50
15	0.01	20.00	0.4530	837.10
16	0.01	20.00	0.4980	846.80
17	0.01	20.00	0.5430	854.50
18	0.01	20.00	0.5880	862.20
19	0.01	20.00	0.6340	869.90
20	0.01	20.00	0.6790	875.70
21	0.01	20.00	0.7240	883.40
22	0.01	20.00	0.7690	887.30
23	0.01	20.00	0.8150	895.00
24	0.01	20.00	0.8600	900.80
25	0.01	20.00	0.9050	904.60
26	0.01	20.00	0.9500	910.40
27	0.01	20.00	0.9870	914.30

 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 11:18

Material: C45-W3P
 Model : $\sigma = C \cdot \epsilon^n$ (Hollomon) (1)
 Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]
 Strain hardening exponent n : 0.12867 [-]
 Characteristic stress C : 904.91509 [N/mm²]
 Correlation coefficient R : 0.9903066 [-]
 Residual sum squared RSS : 5540.724 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach
 werkstoff-nr : -
 source (literature) : -
 test : torsion



 *
 * Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic *
 * material constants *
 *

Date: 11-05-1990
 Time: 22:21

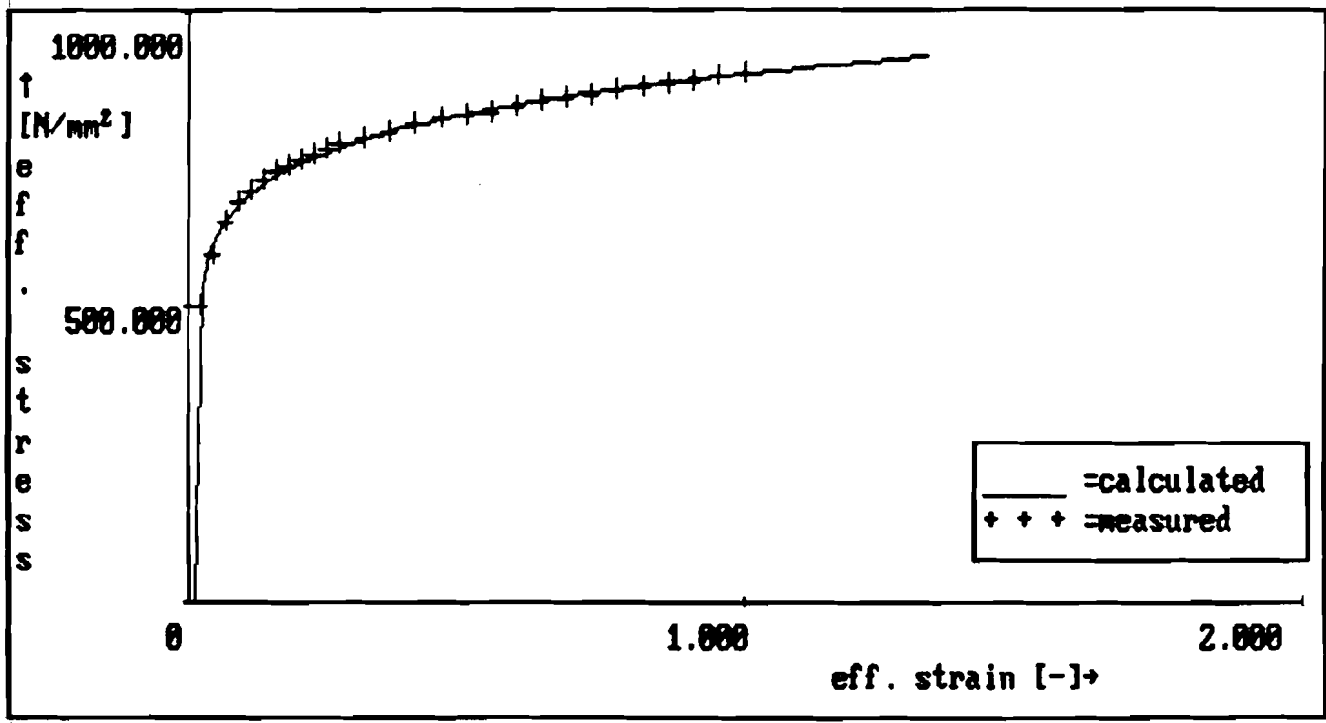
Material: C45-W3P
 Model : $\sigma=C*(\epsilon_0+\epsilon)^\eta$ (Krupskowsky/Swift) (2)

Temperature : 20.00000 [°C]
 Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Strain hardening exponent n : 0.11030 [-]
 Characteristic stress C : 898.65513 [N/mm²]
 Pre strain eps0 : -0.01760 [-]

Correlation coefficient R : 0.9992122 [-]
 Residual sum squared RSS : 457.344 [N/mm²]
 Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr : -
 source (literature) : -
 test : torsion



```

*****
*
*   Temperature and strain-rate dependent calculation of plastic
*   material constants
*
*****

```

Date: 11-05-1990
Time: 22:23

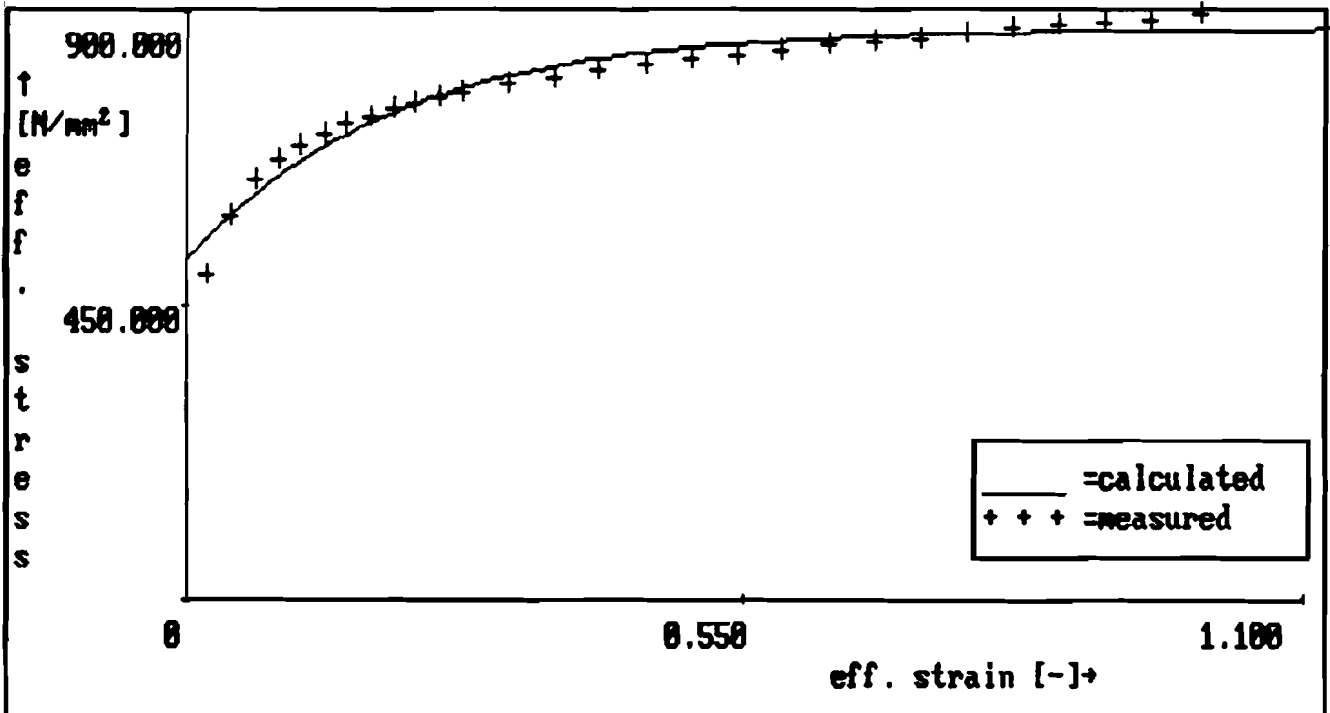
Material: C45-W3P
Model : $\sigma = B - (B - A) \exp(-n\varepsilon)$ (Voce) (4)

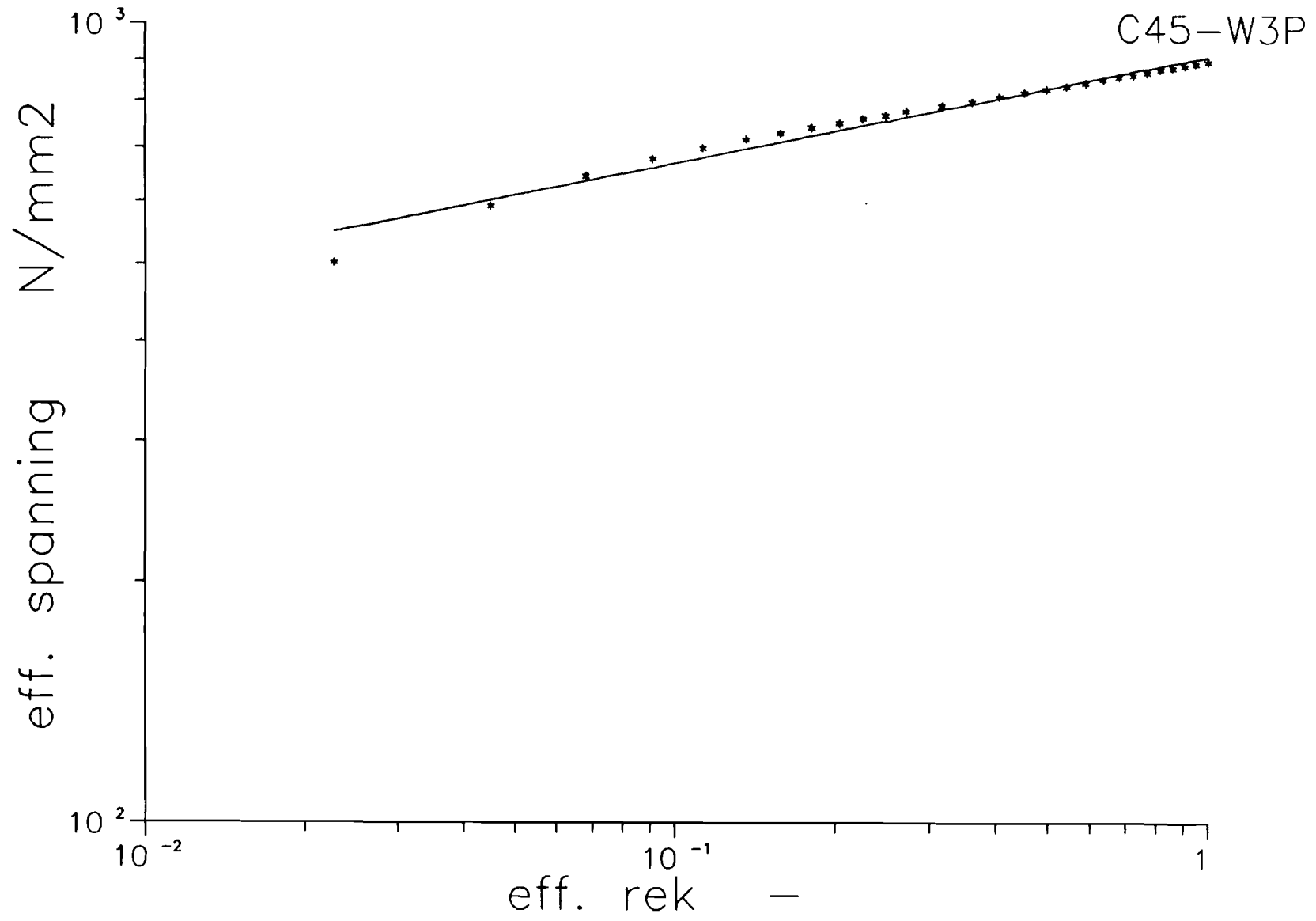
Temperature : 20.00000 [°C]
Strain-rate : 0.01000 [1/s]

Factor n : 4.98320 [-]
Factor A : 520.20380 [N/mm²]
Factor B : 875.69845 [N/mm²]

Correlation coefficient R : 0.9824268 [-]
Residual sum squared RSS : 10004.969 [N/mm²]
Option : lowest residual sum squared, linear approach

werkstoff-nr : -
source (literature) : -
test : torsion





1-05-1990

11:21

Data of material C45-W3P

no	strain-rate	temperature	eff. strain	eff. stress
0	0.01	20.00	0.0226	501.20
1	0.01	20.00	0.0450	590.20
2	0.01	20.00	0.0680	644.20
3	0.01	20.00	0.0910	677.00
4	0.01	20.00	0.1130	698.20
5	0.01	20.00	0.1360	715.60
6	0.01	20.00	0.1580	729.10
7	0.01	20.00	0.1810	740.70
8	0.01	20.00	0.2040	750.30
9	0.01	20.00	0.2260	760.00
10	0.01	20.00	0.2490	767.70
11	0.01	20.00	0.2720	777.30
12	0.01	20.00	0.3170	788.90
13	0.01	20.00	0.3620	798.50
14	0.01	20.00	0.4070	810.10
15	0.01	20.00	0.4530	819.80
16	0.01	20.00	0.4980	827.50
17	0.01	20.00	0.5430	833.30
18	0.01	20.00	0.5880	841.00
19	0.01	20.00	0.6340	850.60
20	0.01	20.00	0.6790	856.40
21	0.01	20.00	0.7240	860.30
22	0.01	20.00	0.7690	868.00
23	0.01	20.00	0.8150	875.70
24	0.01	20.00	0.8600	879.60
25	0.01	20.00	0.9050	885.30
26	0.01	20.00	0.9500	891.10
27	0.01	20.00	1.0000	896.90
28	0.01	20.00	1.0000	896.90