ベリリウム押出し材の高温強度に関する研究*

佐藤千之助** 奥 達 雄**
相沢作衛** 薄 井 洸**

Studies on the Mechanical Properties of Hot Extruded Beryllium at Elevated Temperatures

by

Sennosuke SATO, Tatsuo OKU, Sakue AIZAWA and Takeshi USUI
(Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki)

The hot extruded beryllium of reactor grade purity was studied at elevated temperatures with respect to its tensile, hardness, elastic modulus and creep properties. The thus obtained results have been discussed in comparison with our previous report regarding hot rolled beryllium.

The hardness was regarded as a macroscopic measure for the temperature dependencies of critical slip mechanisms in single crystal.

The elastic modulus up to 1000°C were determined by means of an ultrasonic pulse propagation speed.

The creep tests were carried out in two ways, namely the stress increment method at constant temperatures among the room temperature to 700°C and the temperature cycling method of the triangular temperature variation between 350 and 600°C at constant loads. In the stress increment creep, the steady creep rate and the rupture life in the Larson-Miller diagrams agree reasonably with the corresponding data at The Brush Beryllium Co. by ordinary method. The relation of steady creep rate $\dot{\epsilon}$ and the cycles-to-rupture N_R in the temperature cycling creep was expressed as $\dot{\epsilon} N_R^{0.70} = \text{constant}$. This equation is similar to the formula on strain controlled fatigue. The considerations in the temperature cycling creep of this material have been discussed in comparison with constant temperature creep.

(Received Dec. 15, 1966)

1 緒 論

ベリリウムは比重が非常に軽く (1.84g/cm^3), その割に機械的強度および弾性率が高いので特徴のある強度部材として応用されている。ベリリウムはまた熱伝導率 ($137\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$) が高く, 熱中性子吸収断面積が非常に小さく, 中性子散乱断面積が大きいので原子炉の減速材や反射材として広く実用され, 最近ではそのすぐれた核的利点のため燃料被覆材としての開発研究が行なわれている。しかし, その製造経験ならびに使用経験が必ずしも豊富でなく, その高温の機械的性質についても充分な資料がない。このような現状から日本原子力研究所としてもこの材料の金属学的ならびに機械的性質について各方面の協力を得て共同作業が進められている。

本研究は現在最も広く採用されている高温押出し法によって製造した原子炉反射材用ベリリウム (原研JMTR-C用) を用い, 前報¹⁾に引き続き高温における機

械的性質に関する研究の一環として行なわれた引張性質, 弾性率, 硬度および温度一定応力漸増クリープおよび応力一定温度変動クリープ特性について報告する。

2 供 試 材 料

供試材料 (日本碍子²⁾製) は Fig. 1 に示すベリリウム電解フレークを原料とする粉末冶金工程において黒鉛モールド中で 1100°C において 30kg/cm^2 程度の熱間プレスを行ない, 約 1000°C での熱間押出し成形中の酸化を防ぐため軟鋼のシースに入れて行なわれた。

Fig. 1. Flow diagram of specimen preparation.

* 原稿受理 昭和41年12月15日

** 正 会 員 日本原子力研究所 茨城県那珂郡東海村

Table I. Impurities in the hot extruded specimen(%).

Element	BeO	Fe	Si	Co	Mo	Mn	Mg	Cr	Ni	Al	La	Cu	Ag	B	Pb	Cd	C
Hot extruded Be	1.61	0.135	0.016	0.0005	0.0011	0.0070	0.033	0.094	0.0170	0.055	0.0002	0.0085	<0.001	<0.0002	0.0005	<0.00005	0.09

押出し後, 約 800°C で焼なましを行ない, 所要の機械加工を行ない, ベリリウムの材料を得た. その寸法は 85×85×850mm である.

Table I はこの材料中の不純物の分析結果を示す. 不純物の総量は 2% 以下であって米国材料試験法のベリリウム反射材規格を満足している. なお, これら不純物の量は The Brush Beryllium Co.(米) の原子炉級に比べても少なく, 特に Fe, Al, Mg は著しく低く, Mn, Si の量は若干多いが, 英国原子力庁 (UKAEA) 仕様に対応する程度である.

平均の程度は約 15~20 μ 程度であった.

本研究に使用したベリリウム試料片の形状は, 前報のものほかに, Fig. 2 に示すような高温弾性率およ

び

3・2 硬度試験

5×5×12mm の角柱試片の端面を成型押出し軸に平行および直角になるように採取し, ニコン高温微小硬度計を用いて荷重 300g で, 最高 800°C に至る測定を行なった.

3・3 弾性率測定

弾性率の測定は超音波の伝ば時間の測定により, その弾性縦波速度から算出した. この方法は高温においても適用され, 超音波の発信子, 受信子間に定弾性の⁵⁾⁶⁾黒鉛中間材を介して, 試料の超音波速度を測定した. 試料は水平管状炉に横たえられ, アルゴンふん囲気中にて昇温速度約 2°C/min で, 最高 1000°C に至る測定を行なった.

3・4 クリープ試験

3・4・1 応力漸増法によるクリープ試験 クリープ試験は Fig. 2 (b) に示す平行部 8 ϕ ×50mm を有する試片を用い, 真空型引張クリープ試験機を用い, ゲージ間の長さの伸びを差動トランス方式で検出記録した. クリープ荷重は主として一定温度における応力漸増法により, 同一試片に 1~4 段の応力漸増を行なった. 各段階の実験は少なくとも約 100 hr の負荷時間を取り, 少なくとも 10 時間以上の定常クリープを認めた後, 定常最小クリープ速度を求めた. 次の段階の測定は, 前の荷重を除去し, 応力休止として 3 時間の間, 真空ベローズによる圧縮応力を与えた後, その前の数倍のクリープ速度を与えるよう逐次荷重条件をか酷にさせた. 最終段階では三次クリープ過程を経て破断するが, 破断時間の測定はその前後の試験による破断時間に及ぼす影響は次のような理由で無視し, 最終応力による値を採用した. 破断時間 t_r が破断までのクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の総和によって決まると考え, 負荷応力および温度に無関係に次式

$$t_r \cdot \dot{\epsilon} \cong \text{const.}$$

なる関係がなりたつことが認められている. 前後の $\dot{\epsilon}$ は最終段階の数分の 1 であるから, t_r には最高に見積って約 20% 低下することになる. しかし前段までのクリープはクリープ全過程の大半を占める二次クリープの初期で中止しているから, 結局のところ t_r に及ぼす影響は大きくとも数% 出ないと考えられる. 前段までのひずみの総量もだいたいこの程度であった. こうして得られた破断時間に関する Larson-Miller 線図は他のデータに対しても妥当な結果を示している.

Fig. 2. Shapes of test specimens.

びクリープ試験片を用いた. クリープ試験片はすべて表面層 150 μ ぐらいの化学的研磨を行ない表面加工層の影響を無視できるようにした. この影響は前報に比べて比較的低温の結果に現われる.

高温弾性率およびクリープ試験片はすべて成型押出し軸に平行に採取された.

3 実験方法

3・1 引張試験

この測定は主として日本碍子(株)において行なわれた. 試験片は小寸法の JIS 3 号型であった. 真空中において 800°C に至る引張強度および伸びの測定を行なっ

3・4・2 変温クリープ試験 次にベリリウム燃料被覆材の原子炉の起動、停止に対応する温度変動についてのクリープ性質を検討するため、熱疲労試験機を用い、一定引張荷重を負荷させながら温度範囲600°ないし350°Cの間で二等辺三角形の温度波を与えて4本の実験を行なった。用いた試験片の形状はFig. 2(c)に示すような平行部5φ×40mmの伸び検出用(差動トランス式)のショールダを有するものである。装置の詳細は省略するが、温度変動は真空度 10^{-3} mmHgのオーダのふん囲気で傍熱方式により試片内の均熱性を保持しつつ記録した。荷重はループ荷重計に差動トランス式荷重変換器を取り付け、温度変動下の膨張および収縮に対しても一定になるよう自動調整を行なった。

4 実験結果とその考察

4・1 引張性質

Fig. 3 は200~800°Cに至る引張強度と伸び特性を示す。引張強度には前報の圧延材の場合のような400~500°C付近に波状を示さず比較的なだらかに低下する。伸びは400および600°Cにそれぞれ極大点および極小点を示すような挙動を示した。800°Cにおいては平均37%の伸びがあり、前報の圧延材の場合、780°Cでふたたびぜい化し、ほぼ室温のそれに低下したとことと比較し差異が認められる。

Fig. 3. Tensile strength as a function of temperature for hot extruded beryllium (offered by NGK Insulators Ltd.).

4・2 硬度試験

ベリリウム押し出し軸に平行な面と垂直な面に対し微小硬度計による800°Cまでのピッカースかたさの温度依存性はFig. 4(a)に示すようになった。プロット点は約10点の平均を示している。押し出し軸の影響としては平行の面のほうがいくぶん大きい値を示す。前報と同様、降伏応力の温度依存性の式にならって硬度の対数と絶対温度の逆数に対してプロットすれば、実験範囲において3段の折れ線で表わされる。Fig. 4(b)はこれ

Fig. 4. (a) Vickers hardness number as a function of temperature for hot extruded beryllium.

Fig. 4. (b) Logarithmic hardness number as a function of reciprocal absolute temperature for hot extruded beryllium.

階は底面と柱面(10 $\bar{1}$ 0)すべりが共存し、高温の第3段階ではさらに錐面すべりや、不純物の拡散効果を含む複雑な要素が変形に関与するものと考えられ、硬度によっても微視的変形機構との対応が推定されることは興味ある事である。

前報の圧延材と比較し、全体としての硬度は低く、その折れ点の位置は粒度の比較的小さい場合の温度に近い。

4・3 高温弾性率

超音波パルス速度によって求めた熱間押し出し材についての動的ヤング率の測定の結果はFig. 5に示すとおりである。室温の値は平均 3.00×10^4 kg/mm²で、前述の圧縮試験による値とはほぼ一致するばかりでなく、従来の多くの報告ともよく一致する。音速度は 1.25×10^4 m/sec (比重 $\gamma = 1.86$ g/cm³)であった。約200°Cから500°C近傍まで比較的急減する傾向があり、600°C付近では室温の約2/3程度になる。それ以上、1000°Cまではなだらかな減少がみられる。なお1000°Cに保

Fig. 5. Young's modulus by means of an ultrasonic pulse propagation as a function of temperature for hot extruded beryllium; $E_0 = 3.00 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$.

持した時間は約10分間でその後室温まで炉冷したが、全体として薄い灰色になり、その上に白点状のスケールの発生をみた。

ポアソン比 ν の温度依存性については未着手であるが、剛性率 G についてのBrush社の資料によれば、約500°Cまでヤング率とほぼ等しい温度依存性を示し、それ以上では両者の比が近接する傾向がある。したがって $\nu = (E/2G) - 1$ の等方的弾性論の式をかりに適用すれば500°C程度までは表Iの値が適用されるかもしれないが、もっと高温ではさらに低下することが予想されよう。高温ポアソン比の値は熱応力で問題になるので高温ストレイン・ゲージを用いて測定を計画している。

4.4 クリープ

4.4.1 応力漸増法によるクリープ Fig. 6 は主として応力漸増法による応力 σ と最小クリープ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を示す。図の白丸は応力漸増法における途中のデータであり、黒丸はその最終クリープ強度のデータである。両者は同一の直線によくのる。したがってベリリウムについても測定範囲、室温ないし700°Cにおいて近似的に指数クリープ則がなりたつ。実用される600°C付近では $\dot{\epsilon} = 8.0 \times 10^{-9} \sigma^8$ と近似し、冷却材ガス圧によるクリープの計算を行なった。図のいくつかの応力レベルについて、クリープの活性化エネルギー Q を求めてみると、高温で低応力側(2 kg/mm²)で100 kcal/mol, 低温で高応力側(20 kg/mm²)で約40

Fig. 6. Steady creep rate as a function of applied stress for the hot extruded beryllium.

kcal/mol で、温度によって一様な値にはならないことが示された。ベリリウムについてはKaufmann¹²⁾らによるクリープ破壊データから求めた活性化エネルギーは65 kcal/molである。また、Dorn¹³⁾によれば自己拡散の活性化エネルギーとクリープのそれとは相互に対応する関係があり、純金属の融点に対するクリープまたは自己拡散の活性化エネルギーの関係は対数線図において一直線で表わされる。したがって、いまベリリウムの融点1553°Kに対してこの推定によると約60 kcal/molになる。この値はここに求めたクリープの値の平均に近いが、低温高応力側では高く、高温低応力側では低い。これは定常クリープに対する回復理論のように、低温側では交差すべりが律速過程であり、高温側では転位の上昇運動と熱的自己拡散をあわせ考えるとすると、ベリリウムの場合には実験した温度の範囲にわたり一義的なクリープの変形機構によらないことが理解される。最近、Petroquim¹⁴⁾は鍛造ベリリウム(粒度約140μ)について $Q = 60 \sim 70 \text{ kcal/mol}$ の値を示し、この材料の高温クリープは自己拡散によって支配されないとい述べている。

Fig. 7 の実線は Larson-Miller 流の master rup-

Fig. 7. Master creep rupture curve for hot extruded beryllium and the comparison with data by The Brush Beryllium Co.

ture curve である。この場合の破断時間 t_r , hr と温度 T °K のパラメータ $P = T(c + \log t_r)$ 中の定数 c の値は普通約20と仮定されるが、ここでは温度無限大、すなわち $1/T = 0$ におけるベリリウムの理論的分裂速度に対応する光速速度およびベリリウムの原子間距離から21.7とした。図の点線はBrush社製ベリリウムのデータを整理したもので、BeOの含有量が1, 2および3%の場合を示す。本研究の場合は約2%に対応するから約400°C以上ではよく一致している。その他、高温加圧成型材、押出し材につき中性子照射を行なったものについての断片的なデータを図中にまとめて示した。中性子照射を行なうと同一のパラメータ P に対応する応力が著しく低下する傾向が認められる

Fig. 8. Master creep curve for hot extruded beryllium and the comparison with data by The Brush Beryllium Co.

が、現在のところまだ系統的な研究が行なわれていない。なお、クリープ破断についてのこの整理法を最小クリープ速度 $\dot{\epsilon}$ に適用し、いわゆる master creep curve を求めると Fig. 8 に示すようになる。図の黒丸は途中の応力のそれである。図の点線は同様に Brush 社のデータであるが、400°C 以上では対応する BeO 2% の場合とよく一致する。しかし、400°C 以下の低温では本実験の黒丸と白丸の間に著しい差異があり、同一曲線上にのらない。 $\dot{\epsilon}$ の差異は応力漸増法によるときは往々にして遷移クリープの値を測定し、 $\dot{\epsilon}$ の大きい値をとりがちであるが、たとえば 300°C の場合には低応力の場合には約 100 倍にもなり、実験の精度上、予想をはるかに上回る。したがって、この master creep curve の整理法はこの比較的低温度範囲に対する適用を制限するものであろう。

4・4・2 温度変動下のクリープ Fig. 9 は 600～350°C 間の三角波形温度変動下のクリープ性質の記録例を示す。最高および最低温度の保持時間は 1 分で、1 サイクルの周期は 32.5 分であった。サイクルの進行に対する一般的傾向は温度一定のクリープの場合と同様に遷移、第二次および第三次グリープを示した。

Fig. 10 は負荷応力 σ に対する破断サイクル N_R の関

Fig. 9. A record of creep under temperature-cycling between 350 and 600°C for hot extruded beryllium.

Fig. 10. Applied constant stress and steady creep rate or plastic strain per cycle as a function of cycles-to-rupture under temperature cycling between 350 and 600°C for hot extruded beryllium. The chain line shows a strain-cycling fatigue data at 661°C for a beryllium after Swindeman and Douglas.

係および 1 サイクルあたりの定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_N$ に対する N_R の関係をあわせ示す。 $N_R = 0.5$ に対する σ の値は 600°C における引張強度のデータである。試験数が少ないがおおよそ

$$\sigma = 20 N_R^{-0.27}$$

$$\dot{\epsilon}_N \cdot N_R^{0.7} = 3.2 \times 10^{-2}$$

の関係がある。 $\dot{\epsilon}_N$ はクリープの過程によっていくぶん変化するが、ひずみ制御型疲労試験における塑性ひずみ振幅に対応するものとすれば、Coffin らによる $\dot{\epsilon}_N N_R^\alpha = \text{const.}$ の形式と類似するようにみえる。しかし、Coffin らによる指数 α の値は 0.5 とされ、高温の熱疲労では 0.6 ぐらいになる例が多い。本研究の場合では 0.70 であっていくぶん大きめの傾向を示す。ベリリウムについての熱疲労のデータは少ないが、Swindeman and Douglas の 1250°F におけるデータでは、Fig. 10 に示すように、 $\alpha = 0.81$ となっている。したがって、ベリリウムの場合の本研究のような比較的高温の塑性ひずみ振幅ではかなり大きめの α を示すものと考えてよい。

次に破断サイクル数を周期 hr で除し、これを破断時間 t_r とし、Fig. 7 の定温クリープの場合の master rupture curve と比較すると温度を最高保持温度 ($T = 873^\circ\text{K}$) にとっても図示のように定温クリープの場合よりも破断時間にして数分の 1 に低下することがわかる。

次に Fig. 11 は負荷応力に対する単位時間あたりの第二次定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}$ を求め、点線に示す前節の温度一定の場合と比較したものである。変温クリープの場合は通例、固体状態力学方程式による相当温度を求めると、平均温度よりも高く、最高温度に近い温度を示すことが多い。本研究の 350～650°C の温度変動でも平均温度 (475°C) よりも最高保持温度、つまり 600°C にごく近接した結果が得られた。また、この変動温

Fig. 11. Relation of applied stress and steady creep data per hour under temperature-cycling between 350 and 600°C for hot extruded beryllium. The dotted lines show the constant temperature creep data from Fig. 6.

度クリープのデータを、温度を最高保持温度 ($T=873^{\circ}\text{K}$) として Fig. 8 の master creep curve にプロットすると、定温クリープの曲線とほぼ一致する。なお、ベリリウム押出し材の室温から700°Cに至る1000回のサーマルサイクル試験によると押出し軸に平行および直角方向に対しそれぞれ約1%の収縮および膨張が観測されているが、600°C以下ではそれが無視しうることが知られている。実用上、原子炉内ベリリウムは最高温度600°Cに保持される時間の長い温度波形を示すことから、実験範囲では本材料による場合はクリープ速度に対しては、相当温度によらずとも設計上最高温度をめやすとして取り扱ってさしつかえなさそうであるが、破断時間に関しては低下することがあると結論される。

5 結 論

ベリリウムは延性に乏しいことがこの材料の最大弱点とされ、特に原子燃料被覆材としては室温付近でも延性のあるベリリウムまたはこの合金を製造することが当面の大きな課題となっている。本研究は原子炉反射材として広く適用されている押出し材につき高温における機械的性質につき検討を行なったもので、ここに得られた結果を要約すると次のようになる。

5・1 引張性質

押出しベリリウムの軸方向引張強度は前報の圧延材よりもいくぶん大きい値を示したがこれは押出し比にも関連がある。伸びについては室温において押出し軸に平行方向にはかなりの延性があるが、直角方向には1~1.5%程度であり、高温では400°C付近に極大点があり、全体としてらくだのこぶ状になる。

5・2 硬 度

これは降伏応力または流動応力の一尺度と考えられるが、硬度の対数と試験温度（絶対温度）の逆数の関係は室温ないし800°Cの間で3段の折れ線で示され、その各段が単結晶のすべり限界応力とほぼ対応する関

係が得られた。

5・3 弾性率

超音波パルスの伝ば速度を測定する方式により1000°Cに至るヤング率の温度依存性を明らかにした。室温のデータは従来のそれと類似し、600°Cでは室温の約2/3に低下する。

5・4 クリープ特性

測定範囲室温~700°Cにおいて、温度一定におけるいわゆる応力漸増法によって実験したが、指数クリープ則が成立する。実験結果はLarson-Miller法によって整理し、試験温度、負荷応力、クリープ速度および破断時間の間の関係を検討した。600°Cで10000時間および5000時間に対するクリープ破壊応力はそれぞれ約1.8および2.0 kg/mm²程度であって、現在のところの材料の強度設計上ほとんど応力のかからないような構造にすることが要請される。

また、原子炉の起動停止に対応する温度変動下のクリープ挙動を検討し、600~350°C間の三周波では600°C温度一定のクリープに近いクリープ速度を示し、サイクルあたりの塑性ひずみと破壊サイクル数の間には、 $\dot{\epsilon}_N N_R^{0.70} = 3.2 \times 10^{-2}$ なる関係が得られた。

終わりにのぞみ、本研究は原研と日本碍子(株)との共同研究の一環として行なわれたものであることを明らかにし、貴重な試料の準備に協力された同社研究所西垣課長はじめ関係の皆様へ感謝の意を表する。

(昭和41年11月24日 日本材料学会第8回高温強変シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Darwin, G.E., and J.H. Buddery, "Beryllium" (1960) Butterworths Sci. Publ.
- 2) 原子力金属懇談会, "ベリリウム" (1961) 新金属協会
- 3) 佐藤千之助, 奥達雄, 柚原俊一, JAERI-memo, 2208 (1966).
- 4) 佐藤千之助, 奥達雄, 薄井洸, 材料, **16**, 194 (1967).
- 5) 佐藤千之助, 宮園昭八郎, 機械学会誌, **69**, 1146 (1966).
- 6) Sato, S., and S. Miyazono, Carbon, **2**, 103 (1964).
- 7) 平修二, 大南正瑛, 日本機械学会論文集, **27**, No. 176, 387 (1961).
- 8) Kawasaki, M., and M. Sasagawa, Third Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Paper, No. 431 (1964).
- 9) The Brush Beryllium Co., "Beryllium in Aero/Space Structure" (1964).
- 10) Tuer, G.L., and A.R. Kaufmann, "The Metal

- Beryllium”, Chapt. 7, ASM, (1955).
- 11) Oku, T., S. Sato, and T. Fujimura, Nucl. Struct. Engg., (Amsterdam) **2**, 282 (1965).
 - 12) Kaufmann, A.R., P. Gordon, and D.W. Lillie, Trans. ASM, **42**, 785 (1950).
 - 13) Dorn, J.E., “Proc. Creep and Fracture of Metals at High Temperature”, N.P.L., p.89 (1956).
 - 14) Petrequim, P.P., Intern. Conf. Beryllium Metall., Greroble, Paper, No. 39 (1965).
 - 15) O'Rourke, R.G., *et al.*, AEC Rept. COO-312 (1956).
 - 16) Bush, S.H., “Irradiation Effects in Structural and Cladding Materials” (1965).
 - 17) Coffin, L.F., ASTM STP, No. 151 (1953); Trans. ASME, **76**, 931 (1954); ASTM STP, No. 165 (1954).
 - 18) 鵜戸口英善, 高圧力, **4**, 681 (1966).
 - 19) Swindeman, R.W., and D.A. Douglas, J. Basic Engg., **81**, 203 (1959).
 - 20) 平修二, 大南正英ら, 日本機械学会論文集, **27**, 373, 381 および 387 (1961).
 - 21) 西垣進, 新金属工業, p. 167 (1966年6月号).

American Society for Testing and Materials (ASTM) において Temperature Effects に関する Special Technical Publication (STP) としては次のようなものがある.

STP 165 Symposium on Effect of Cyclic Heating and Stressing on Metals at Elevated Temperatures. (1954)

STP 260 Literature Surveys on Influence of Stress Concentrations at Elevated Temperatures and Effect of Non-Steady Load and Temperature Conditions on the Creep of Metals. (1959)

STP 287 Symposium on Low-Temperature Properties of High-Strength Aircraft and Missile Materials (1961)

STP 302 Symposium on Evaluation of Metallic Materials in Design for Low-Temperature Service. (1962)

STP 303 Symposium on Elevated Temperature Compression of Sheet Materials. (1962)

STP 374 Irreversible Effects of High Pressure and Temperature on Materials. (1965)

STP 387 Behavior of Materials at Cryogenic Temperatures. (1966)

Fatigue に関する STP としてはたとえば次のものがある.

STP 237 Basic Mechanisms of Fatigue. (1959)

STP 274 Symposium on Fatigue of Aircraft Structures. (1960)

STP 284 Symposium on Acoustical Fatigue. (1961)

STP 338 Symposium on Fatigue Tests of Aircraft Structures—Low Cycle, Full-Scale and Helicopters. (1963)

STP 381 Symposium on Fracture Toughness Testing and Its Applications. (1965)

また Erosion, Corrosion に関するものとしては次のものがあげられる.

STP 307 Symposium on Erosion and Cavitation. (1962)

STP 290 Twenty-year Atmospheric Corrosion Investigation of Zinc-Coated and Uncoated Wire and Wire Products. (1961)

STP 368 Corrosion of Zirconium Alloys. (1965)

STP 397 Stress-Corrosion Cracking of Titanium. (1966)