(昭和 50 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

J -積分による破壊基準について

正員 金 沢 武* 正員 町 田 進*

正員 金 田 重 裕* 正員 小 野 塚 正 一**

A Study on J -Integral as a Fracture Criterionby Takeshi Kanazawa, *Member* Susumu Machida, *Member*Shigehiro Kaneda, *Member* Masakazu Onozuka, *Member*

Summary

The J -integral has been proposed as an engineering fracture criterion for elastic-plastic behavior in metals.

The J -integral, as is defined, has several advantages over some other currently used fracture parameters. But the experimental evidence so far obtained to show its practical usefulness have been limited.

Using an ordinary ship steel, the authors investigated some practical aspects of the J -integral as a fracture criterion. The value of J was evaluated from several different methods including numerical (finite element analysis) as well as experimental (load vs. load point displacement record) procedure. The specimen used are center-notched tension, compact tension and bend specimens with varied dimensions. The critical values of J were evaluated from brittle fracture tests using these specimens.

The method to evaluate J -value from single load-displacement record, originally proposed by Rice et al., has been modified by the authors to yield better results. Relation between J and COD and their equivalence are discussed. It is concluded that J concept is almost equivalent to the COD concept and thus J_c would be one of the useful measures of fracture toughness, especially in case of fracture under large scale yielding condition.

・ 1 緒 言

構造物の破壊に対する安全を確保するために現在まで数多くのクライテリオンが提唱され精力的に研究が進められた結果、次第に巨視的な破壊現象の取り扱いが可能となりつつある。特に高強度で小規模降伏下で破壊する材料については線型破壊力学の適用により多大な成果を収めるに至っている。一方低中強度鋼の如くかなりの塑性変形がクラック先端に生じた後、不安定亀裂の伝播開始が観察される材料については切欠先端の塑性変位に注目した COD 仮説が提唱されている。ヨーロッパ諸国ならびに日本において多数の実験的検討がなされ、その有用性が明らかとなりつつあり、材質判定規準、構造設計への適用が試みられるまでに至っている。しかしながら COD 概念は多分に経験的な意味合いが強く明確な定義に欠けるとの批判も強い。実際には切欠先端の開口変位量の測定が事実上不可能であることから、測定可能な値より先端値を推定しており、一種のあいまいさが存在する。また破壊防止設計の側面から欠陥を評価するに当り最も重要と考えられる応力・歪集中部に存在する亀裂についてその開口挙動は、Dugdale 模型の適用により求めることは可能であるが非常に困難であろう。従って COD 概念のこのような問題に対する直接的な適用は適当でないと考えられる。また亀裂に対して平行な応力成分の存在する場合についても同様であろう。

* 東京大学工学部

** 東京大学工学系大学院

他方塑性変形を伴う場合の破壊のパラメタとして Rice^{1,2)}の提唱した J -積分がある。米国においては K_{IC} 試験の小型試験法として理解され最近研究が進められている。この J -積分は線型および非線型弾性体については破壊のエネルギー条件に関連しており、全歪理論に従う塑性体では切欠先端での応力・歪の特異性に対応している。さらに Path-Independent である周回積分の定義に従えば、複雑な境界条件を有する亀裂体についても J -積分を算定することが可能である。このことから特に COD 概念の直接の適用が困難な応力・歪集中部に存在する亀裂からの不安定破壊等について J -積分を用いることにより、より定量的な取り扱いが可能となろう。本報告では、その第一歩として、 J -積分の破壊基準としての可能性を実験的に検討し、COD 概念との対応を調査したものである。

2 J -積分の算定法

破壊基準としての J -積分 (J_c 値) の議論をする前に与えられた境界条件のもとでの亀裂の J -積分を算定する必要がある。 J -積分を求めるには、それが Potential Energy の Decrease Rate で定義されること、あるいは Path Independent Contour Integral であるとの定義に従って求める方法と Rice らにより提唱された 1 本の荷重変位曲線を基にして求める方法が考えられる。

2.1 Potential Energy の Decrease Rate としての J -積分の定義より求める方法

切欠長さのみが異なる 2 つの物体を考えると J -積分は次式で定義される。

$$J = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta \Pi}{\Delta a} \right) \quad (1)$$

Π : Total Potential Energy a : 亀裂長さ

上式は端部境界条件により一般化された荷重 (Q)、一般化された荷重点変位 (q) を用いて次式のようにも表わすことができる。

$$J = \int_0^q \left(\frac{\partial q}{\partial a} \right)_Q dq \quad (\text{荷重一定}) \quad (2)$$

$$J = \int_0^Q \left(-\frac{\partial Q}{\partial a} \right)_q dq \quad (\text{変位一定}) \quad (3)$$

(Fig. 1 (a), (b) 参照)

実際の計算を行なうには何らかの方法で亀裂長さ a のみが異なり他の境界条件は同一である亀裂体について荷重点変位を求め図式微分を行なう。この方法に関しては Begley ら^{3,4)} が切欠長さ a のみが異なる試験片を作成して実験的に数本の荷重・変位曲線を求め J -積分を算定している。しかし切欠長さ Δa の取り方、さらに試験片製作、実験における測定精度の問題もあり十分な結果を得ているとは言い難いようである。宮本ら⁵⁾ は有限要素法を用いて数値的に荷重・変位曲線を求め J -積分を算定している。

2.2 Path Independent Contour Integral としての J -積分の定義より求める方法 (Fig. 2 参照)

J -積分は次式で定義されるものである。

$$J = \int_r \left\{ W(\epsilon_{mn}) dy - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} ds \right\} \quad (4)$$

$W(\epsilon_{mn})$: 歪エネルギー密度 Γ : 亀裂端を囲む任意の移動経路 $\mathbf{T}$: Γ 上の応力ベクトル

$\mathbf{u}$: 変位ベクトル

この場合には亀裂を含む応力・歪場の計算が必要である。この方法により Kobayashi ら⁶⁾ は有限要素法により J -積分を算定しており、一方向負荷の場合には塑性域内の高歪領域に積分経路をとらない限りでは増分理論による計算でもほぼ Path Independent であることを示している。

2.3 1 本の荷重変位曲線から J -積分を求める方法

Rice ら⁷⁾ の提案になる方法で 2.1 の方法と異なり 1 本の荷重・変位曲線より J -積分を求めることができる。本報告では 2.2 に述べた方法と結果を比較し若干これに修正を施した方法 (A 法と呼ぶこととする) により J -積分を算定した (Rice らの提案した方法を B 法と記す)。

2.3.1 Rice らの提案した方法 (B 法)

荷重点変位を q_{total} とすると q_{total} は亀裂の存在しない場合の変位 $q_{\text{no crack}}$ と亀裂が存在することによる増分 q_{crack} とに、あるいは弾性変形による変位 q_{elastic} と塑性変形による変位 q_{plastic} とに分離できる。すなわち

あるいは

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{total}} &= q_{\text{no crack}} + q_{\text{crack}} \\ q_{\text{total}} &= q_{\text{elastic}} + q_{\text{plastic}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

さらに、変形 q_{crack} , q_{plastic} がもっぱら亀裂断面部分のみに集中すると考えてよい程度に亀裂長さが深い場合には

$$q_{\text{crack}} \text{ OR } q_{\text{plastic}} = b \times f(\sigma_N) \quad (6)$$

σ_N : 切欠断面における実断面応力 b : 切欠部断面寸法

(6) 式を(2)式に代入して変形すると代表的な試験片について J -積分を次式のように表わすことができる。

$$\text{引張試験片} \quad J = G + \frac{1}{b} \left\{ 2 \int_0^{\delta_{\text{plastic}}} P d\delta_{\text{plastic}} - P\delta_{\text{plastic}} \right\} \quad (7)$$

$$\text{曲げ試験片} \quad J = \frac{2}{b} \int_0^{\theta_{\text{crack}}} M d\theta_{\text{crack}} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Compact Tension 試験片} \\ \text{3点曲げ試験片} \end{aligned} \right\} J = \frac{2}{b} \int_0^{\delta_{\text{crack}}} P d\delta_{\text{crack}} \quad (9)$$

ただし、

P , δ_{plastic} , δ_{crack} : 単位板厚当りの荷重, 荷重点変位の塑性成分, 亀裂の存在による増分

M , θ_{crack} : 単位板厚当りの曲げモーメント, 回転角の亀裂の存在による増分

G : 亀裂進展力

本方法により実験的に荷重ないしは変位に対し J -積分を求めた例は報告されていないようである。

2.3.2 著者らの提案するB法の修正法(A法)

(6) 式が成立するだけ十分に切欠比 (a/d , a : 亀裂長さ, d : 試験片深さ) が大きいという前提は通常の試験片を考えた場合には成立しないことも多い。そこで(6)式の代りに

$$q_{\text{crack}} = s \cdot f(\sigma_N) \cdot g\left(\frac{a}{d}\right) \quad (10)$$

s : 試験片を代表する寸法 $f(\sigma_N)$: 切欠部実断面応力の関数 $g\left(\frac{a}{d}\right)$: 切欠比の関数

とおいて先に述べたと同様に变形すれば J -積分の表示が得られる。なお以下に示すように J -値の算定には

$$\alpha = g'\left(\frac{a}{d}\right) / g\left(\frac{a}{d}\right) \quad (11)$$

の値が必要になるが変形に関しては応力と異なり弾性の場合とあまり変わらないと考えられるので

$$\alpha_{\text{elasto-plastic}} \doteq \alpha_{\text{elastic}}$$

と仮定する。 α の値は応力拡大係数 K の求められている問題については簡単に求めることができる(例えば文献8)参照)。以下代表的な小型試験片について示すと、

(1) 3点曲げ試験片

$$\delta_{\text{crack}} = s \cdot f_1\left(\frac{P \cdot s}{b^2}\right) g_1\left(\frac{a}{d}\right) \quad (12)$$

s : 曲げスパン P : 荷重(単位板厚) b : 切欠部断面長さ a : 切欠長さ d : 試験片深さ

$$\begin{aligned} g_1\left(\frac{a}{d}\right) &= \left(\frac{a}{d}\right)^2 \left\{ 5.58 - 19.6\left(\frac{a}{d}\right) + 36.82\left(\frac{a}{d}\right)^2 - 34.94\left(\frac{a}{d}\right)^3 + 12.77\left(\frac{a}{d}\right)^4 \right\} \\ J &= \frac{\alpha_1}{d} P \delta_{\text{crack}} - \left(\frac{\alpha_1}{d} - \frac{2}{b}\right) \int_0^{\delta_{\text{crack}}} P d\delta_{\text{crack}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\alpha_1 = g_1'\left(\frac{a}{d}\right) / g_1\left(\frac{a}{d}\right)$$

$$a/d = 0.50 \text{ の場合 } \alpha_1 = 2.20 \text{ となり } J = \frac{1}{b} \left[1.10 P \delta_{\text{crack}} + 0.898 \int_0^{\delta_{\text{crack}}} P d\delta_{\text{crack}} \right] \quad (14)$$

(2) 4点曲げ試験片

$$\theta_{\text{crack}} = f_{\text{II}}\left(\frac{M}{b^2}\right) g_{\text{II}}\left(\frac{a}{d}\right) \quad (15)$$

M : 単位板厚当りの曲げモーメント

$$g_{II}\left(\frac{a}{d}\right)=\left(\frac{a}{d}\right)^2\left\{5.93-19.69\left(\frac{a}{d}\right)+37.14\left(\frac{a}{d}\right)^2-35.84\left(\frac{a}{d}\right)^3+13.12\left(\frac{a}{d}\right)^4\right\}$$

$$J=\frac{\alpha_{II}}{d}M\theta_{crack}+\left(\frac{2}{b}-\frac{\alpha_{II}}{d}\right)\int_0^{\theta_{crack}}Md\theta_{crack}$$

$$\alpha_{II}=g_{II}'\left(-\frac{a}{d}\right)/g_{II}\left(-\frac{a}{d}\right)$$
(16)

$a/d=0.50$ の場合 $\alpha_{II}=2.32$ となり

$$J=\frac{1}{b}\left[1.19M\theta_{crack}+0.808\int_0^{\theta_{crack}}Md\theta_{crack}\right]$$
(17)

(3) Compact Tension 試験片

$$\delta_{crack}=b\cdot f_{III}\left(\frac{P}{b}\right)g_{III}\left(\frac{a}{d}\right)$$

$$g_{III}\left(\frac{a}{d}\right)=\left(\frac{a}{d}\right)^2\left\{0.50-4.18\left(\frac{a}{d}\right)+20.9\left(\frac{a}{d}\right)^2-69.3\left(\frac{a}{d}\right)^3+160.8\left(\frac{a}{d}\right)^4\right.$$

$$\left.-256.1\left(\frac{a}{d}\right)^5+267.1\left(\frac{a}{d}\right)^6-164.8\left(\frac{a}{d}\right)^7+46.6\left(\frac{a}{d}\right)^8\right\}$$

$$J=\left(\frac{\alpha_{III}}{d}-\frac{1}{b}\right)P\delta_{crack}-\left(\frac{\alpha_{III}}{d}-\frac{2}{b}\right)\int_0^{\delta_{crack}}Pd\delta_{crack}$$

$$\alpha_{III}=g_{III}'\left(-\frac{a}{d}\right)/g_{III}\left(-\frac{a}{d}\right)$$
(19)

$a/d=0.50$ の場合 $\alpha_{III}=4.89$ となり

$$J=\frac{1}{b}\left[1.44P\delta_{crack}-0.44\int_0^{\delta_{crack}}Pd\delta_{crack}\right]$$
(20)

本報告では J -積分の値を算定するに当り (4) 式に従い有限要素法による計算を行なうと同時に A 法、B 法によっても算定し相互の比較を行なった。

3 解析および実験

3.1 試験材および試験片形状

供試鋼板は板厚 20 mm の造船用軟鋼で、機械的性質、化学成分は Table 1, 2 に示す通りである。

本報告では J_c 値の一義性を検討するため Fig. 3 に示す 3 種の試験片につき解析ならびに実験を行なった。すなわち幅 500 mm の中央切欠付引張試験片 (D. T. と書く), ASTM E-399 規定の 2 倍の寸法の Compact Tension 試験片 ($a=2t$; a : 切欠長さ, t : 板厚), さらに 3 種の曲げ試験片 (B-1, B-2-A, B-2-B) である。曲げ試験片 B-1 については $a=t$, $a/d=0.5$ (d : 試験片深さ) の標準曲げ試験片, B-2-A は B-1 の 2 倍すなわち $a=2t$, $a/d=0.5$, B-2-B は B-2-A と切欠長さのみが異なる $a=t$, $a/d=0.25$ の曲げ試験片である。なお負荷方式は 4 点曲げによった。Compact Tension 試験片では切欠開口部変位, 負荷点間の変位, 曲げ試験片では内側支持点回転角, 切欠開口部変位を測定した。

3.2 J -積分の解析

それぞれの試験片について有限要素法による平面応力弾塑性解析 (増分法) を行なった。降伏条件は Mises の降伏条件, ヤング率 $E=21,000$ kg/mm², 加工硬工率 $E_t=0$, ポアソン比 0.3 とした。

Fig. 4 に 1 例として Compact Tension 試験片の要素分割, 積分経路を示す。Fig. 5 に実測した切欠開口部変位と有限要素法によるその比較を示す。有限要素法による計算はほぼ実際の試験片の挙動を表現していると考えられる。

Fig. 6 に塑性域の進展状況を示す。全面降伏に近づくとき急速な塑性域の進展が見られる。

Fig. 7 に各試験片につき求めた J -積分の値を荷重に対して示す。ここで得られた J の線型弾性解すなわち G と同一の亀裂について得られている応力拡大係数 K の数値解を比較すると, いずれの場合も K の値で 3% 以内の精度で求まっており, 何ら特別な工夫をしていないにもかかわらず周回積分を施せば実用上十分な精度で J -積分の値が求められていると考えられる。

Fig. 8 に曲げ試験片の場合の切欠開口部変位と J -積分の関係を示す。Fig. 7, 8 に A 法, B 法により実験値より算定した J -積分の値を示してあるが, A 法による値はほぼ有限要素法による周回積分により得られた値と一致している。

一方 B 法はやや低めの値を示しており, 特に切欠比の小さい B-2-B の試験片については相違が大きいの。これは B 法における前提すなわち試験片の他の寸法に比し切欠が十分長く変形が切欠部断面に集中するという前提が成立しないためであり, A 法の如く切欠長さによる修正を施せばほぼ正確に J -積分の値を算定できると考えられる。従って A 法によれば全面降伏以前について純実験的に J -積分を算定することができると考えることができ, さらに有限要素法による計算の困難な全面降伏以降についても積分の値を推定できるものと考えられる。

3.3 破壊試験および結果

各試験片の試験温度と破壊荷重の関係を Fig. 9 に示す。これらの結果より各温度に対し材料特性値 J_c を決定するわけであるが試験片の変形挙動および実験での測定精度を勘案すると最も信頼しうる J_c はどのような方法でこれを求めるべきかを明らかにする必要がある。特に小型試験片では切欠先端近傍の応力・歪状態が限界状態に到達する以前に試験片の切欠部断面全体が降伏する事が多いという事実からも破壊荷重のみから J_c 値を決定することは誤差が大きくなることは明らかである。また全面降伏近くでは小さな負荷の増分に対しても変位の増分は大きくその結果として J -積分の値の増加は大きく, 荷重から算定しようとする場合には荷重の測定精度が微妙に影響する。

一方変位の測定精度に関しては低荷重域では変位の絶対値が小さく精度の良い測定は困難であるが全面降伏に近くなり変位が大きくなれば測定精度も高まる。

以上のことから全面降伏以前は破壊時の荷重から, また全面降伏近傍ないしはそれ以降については破壊時の変位より J_c 値を算定するのが妥当と考えられる。

以上の考察を基礎として本報告では大型の中央切欠付試験片については破壊荷重より, また小型の Compact Tension 試験片, 曲げ試験片については切欠部断面の 1 軸降伏を考えた最高荷重 (P_Y), 最大曲げモーメント (M_P) に対して破壊荷重 P , 破壊曲げモーメント M が $P/P_Y=0.8$, $M/M_P=0.8$ を境にそれ以下では破壊荷重より, それ以上では破壊時の切欠開口部変位より J_c 値を算定した。

Fig. 10 に以上の原則に従い各温度に対して求めた J_c 値を示す。ごく低温域で大型試験片が小さめの値を示しているがそれを除けば試験片寸法, 形状, 荷重様式によらず一定値を示しており, J_c 値の破壊のパラメタとしての有効性を示している。大型試験片が低めの値を示している領域は K_{IC} 値でも議論できる領域であり非常に靱性値の小さな領域である。低めの値を示した原因としては大型試験片の作成上の不可避の要因 (例えばタブ板溶接による面外角変形等) が微妙に作用した結果, 単純な 2 次元解析以外の因子により見かけ上 J_c 値が低下したのと考えられる。以上のことを考慮すれば, J_c 値は荷重様式, 試験片寸法, 形状によらず一定値を示しており, 工学的, 巨視的な破壊のパラメタとして十分な有効性を持つものと考えられる。

4 J -積分と COD 概念

Dugdale-Barenblatt Model で J -積分の積分経路を塑性域に沿ってとれば切欠先端 COD 値と J -積分の間には

$$J = \sigma_Y \cdot \delta \quad (21)$$

σ_Y : 降伏応力 δ : 切欠先端 COD

の関係がある。本研究で求められた J -積分の値についても類似の関係が存在すると予想される。Fig. 11 に中央切欠付引張試験片と曲げ試験片の場合の先端 COD 値と J -積分の関係を示す。引張試験片は本実験に供した切欠比 $a/w=0.4$ の試験片で先端 COD 値は D. B. Model により算定した。曲げ試験片については J -積分の値は有限要素法による値と A 法による値を, またクリップゲージの読みから先端 COD 値への換算は著者らの提案による方法 ($\sigma_N/\sigma_Y < 1.5$ では有限要素法による計算値, $\sigma_N/\sigma_Y > 2.0$ では rotational factor $r=1/3$ による換算値を用いる方法)⁹⁾, さらに BSI DD-19¹⁰⁾ に記載されている Wells の換算式による切欠開口部変位からの換算値を同時に示した。

引張試験片, 曲げ試験片で同一の関係を示しており, COD 概念と J -概念は一対一に対応しているといえる。特に曲げ試験片における COD 値の推定に関して Wells による式は J -概念と非常に良好な対応を示している。

逆に曲げ試験片における先端 COD 値の推定法は多分に経験的、実験的に決定されたものであるが J-積分の概念からもその推定法が妥当なものであると結論できよう。

5 結 論

塑性変形を伴う不安定破壊のパラメタとして J-積分を実験的に検討した結果、次の結論を得た。

- (1) 有限要素法および本論文で提案した A 法により J-積分の値を決定することができる。
- (2) 大型引張試験, Compact Tension 試験, 曲げ試験で得られる J_c 値はほぼ等しく, 破壊基準として J_c 値は有効である。
- (3) J-概念と COD 概念の対比を行なった結果, 一対一に対応することが確認された。
- (4) J-積分の特質を生かして特に COD 概念の直接の適用が困難な応力・歪集中部に存在する亀裂からの破壊挙動の定量的取扱いが可能となると考えられる。

謝 辞

本研究の実験ならびに解析にあたり, 金子助手, 新村助手, 森田技官をはじめ東京大学工学部船舶工学科強度実験室の方々, ならびに岡田正樹氏, 田中誠一氏(当時東大工学部学生)には多大のご助力を頂いた。また日本造船学会溶接研究委員会第 1 分科会委員各位からは貴重な討論を頂いた。ここに厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) J. R. Rice : A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, J. Appl. Mech., Vol.35 (1968), p.379.
- 2) J. R. Rice : Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture, Fracture, Vol. 2, Chap.3, Academic Press (1968), p.191.
- 3) J. A. Begley, J. D. Landes : The J-integral as a Failure Criterion, ASTM STP 514 (1972), p.1.
- 4) J. D. Landes, J. A. Begley : The Effect of Specimen Geometry on J_{IC} , ASTM STP 514 (1972), p.24.
- 5) H. Miyamoto, T. Miyoshi : Study on J_{IC} Fracture Criterion, J. Faculty of Engg., Univ. Tokyo, Vol XXXII, No. 4 (1974), p.645.
- 6) A. S. Kobayashi, S. T. Chiu, R. Beeuwkes : A Numerical and Experimental Investigation on the Use of J-Integral, Engg. Fract. Mech. (1973) p.293.
- 7) J. R. Rice, P. C. Paris, J. G. Merkle : Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates, ASTM STP 536 (1973) p.231.
- 8) H. Tada, P. C. Paris & G. R. Irwin : The Stress Analysis of Cracks, Handbook, Del Research Corporation (1973).
- 9) 金沢 武, 町田 進, 萩原行人, 小林順一 : 工業的試験法としての曲げ COD 試験について (第 2 報), 日本造船学会論文集, 第 134 号 (1973) p.365.
- 10) Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing, DD 19, 1972, British Standard Institution (1972).

Table 1 Mechanical Properties of Plate Tested

Code	Plate Thickness (mm)	Tension Test			Charpy Test		
		σ_Y (kg/mm ²)	σ_U (kg/mm ²)	Elongation (%)	D	v_{TS} (°C)	v_{E-20} (Kg.m)
KEN	20	30.3	46.8	42.0 G.L.=50 mm	L	-25	15.6
					C	-25	8.0

Table 2 Chemical Composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al
0.13	0.26	0.91	0.019	0.006	0.01	0.02	0.02	0.018

Fig. 1 Schematic Interpretation of J-integral (Energy Variation)

Fig. 2 Schematic Interpretation of J-integral (Path-integral)

(1) Deep Notch Specimen (D.T.)

(2) Compact Tension Specimen (C.T.)

(3) Slow Bend Specimen

Fig. 3 Specimen Geometries

Fig. 4 Example of the Element Layout (Compact Tension Specimen)

Fig. 5 Crack Opening Displacement (Compact Tension Specimen)

Fig. 6 Plastic Zone Extension (Compact Tension Specimen)

(a) Center-Notched Plate under Uniform Tension

(b) Compact Tension Specimen

Fig. 7 *J*-integral vs. Normalized Applied Load

Fig. 7 J-integral vs. Normalized Applied Load

Fig. 8 J-integral vs. Normalized Crack Mouth Opening Displacement

Fig. 9 Fracture Test Results

Fig. 10 Critical Value of J-integral (J_c) vs. Temperature

Fig. 11 Non-Dimensional J vs. Non-Dimensional C.O.D.