(昭和 48 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

鋼板の靱性に及ぼす組立工程における 加工の影響 (その 3)

—鋼板の靱性に及ぼす線状加熱条件の影響について—

正員 木 原 博*	正員 栖 原 二郎**
黒 川 常 夫***	正員 片 岡 繁 夫***
修 行 稔***	正員 中 島 正 樹****
正員 矢 島 浩****	正員 深 江 達 郎****

Effect of Fabricating Method at Assembly Stage on
Notch Toughness of Steel Plates (Report No. 3)

—Effect of Line-Heating Condition on Notch Toughness of Steel Plates—

by Hiroshi Kihara, <i>Member</i>	Jiro Suhara, <i>Member</i>
Tsuneo Kurokawa	Shigeo Kataoka, <i>Member</i>
Minoru Shugyo	Masaki Nakajima, <i>Member</i>
Hiroshi Yajima, <i>Member</i>	Tatsuro Fukae, <i>Member</i>

Summary

It is inevitable that high-strength steels of the 50 kg. per sq. mm. class suffer from some embrittlement when they are subjected to bending by the line-heating process. The embrittlement, however, is localized in some limited zone of the plate thickness. Therefore, it is a problem to estimate the notch toughness of the line-heated zone by the Charpy V-notch impact test as generally performed.

In this study, an investigation was made to find the behaviour of the full thickness of the plates to the characteristics of brittle fracture initiation (by the Deep Notch test) and crack propagation-arrest (by the Double Tension and ESSO tests) at the line-heated zone, using large-sized test specimens including full thickness plate.

The results of the above-mentioned tests are examined about criterions of $\sqrt{T_{rs}}$, ${}_{16}T_{IC}=10$, ${}_{16}T_{aKc}=220$ and ${}_{16}T_{aKc}=439$. Consequently, having control of cooling condition, the more efficient conditions of line-heating than the actually suggested ones are obtained without the much embrittlement of plate. The line-heating conditions are outlined as follows ;

- 1) In air-cooling after heating, there is no unfavourable effect observed even if the heating temperature is as high as 800 or 900°C.
- 2) In water-cooling immediately after heating, there is no unfavourable effect observed when the heating temperature is as high as 650°C.
- 3) In water-cooling during air-cooling after heating, there is comparatively little unfavourable effect observed when the heating, temperature is 800 or 900°C, as long as the temperature at the

* 大阪大学溶接工学研究所

** 九州大学工学部

*** 長崎大学工学部

**** 三菱重工(株)技術本部長崎研究所

start of water-cooling is below 500°C.

1 は し が き

一般に鋼板の線状加熱条件の選定に際して、その材質におよぼす影響を十分考慮すべきであることはいうまでもないが、現在船殻材としてますます使用量の増大しつつある 50 キロ級高張力鋼板の場合、軟鋼板の場合と比べて、 A_{c1} 変態点以上の加熱あるいは高温からの水冷は、切欠靱性におよぼす影響が大きいという理由から、変態点以下の加熱でしかも空冷という必要以上に安全側の条件で施行されることが多いのが現状である。しかしながら、このような条件では、実用上極めて非能率であるので、加熱温度をより高くして曲げ効率を上げ、水冷によって作業能率の向上を図ることがのぞましい。

従来、この線状加熱条件の設定には、加熱表層部の V-ノッチ・シャルピー衝撃試験結果が基準とされてきたが、特に厚板の場合、このような局部的靱性を基準にして加熱部全板厚の脆性破壊に対する安全性を論ずることには疑問があると考えられる。すなわち、鋼板の極く表層に局部的な脆化部が存在したとしても、板厚全体として考えた場合に脆化の程度がさほどでなければ、実用上問題は無いはずである。

このような見地から、本研究では、信頼性の高い大形試験片を使用して、全板厚を対象とした脆性破壊試験を行ない、線状加熱条件と加熱部の脆性亀裂発生および伝播停止特性の関係を定量的に把握し、その結果に基づいて適正な線状加熱作業条件について検討を行なったので紹介する。

2 試 験

2.1 試 験 方 法

供試材：供試材としては、日本海事協会（NK）規格の船体用 50 キロ級高張力鋼 A 級鋼（K 5 A 鋼，板厚 30 mm），D 級鋼（K 5 D 鋼，板厚 30 mm および 12.7 mm）および E 級鋼（K 5 E 鋼，板厚 30 mm）を使用した。供試材の化学成分ならびに機械的性質を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of steel used

Specification	Heat Treatment	Plate Thickness (mm)	Chemical Compositions (%)					Tensile Properties		
			C	Si	Mn	P	S	Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	Elong. (%) (G.L.=200 mm)
K 5 A	As Rolled	30	0.12	0.34	1.24	0.025	0.020	37.8	52.4	25.2
K 5 D	Normalized	30	0.15	0.46	1.31	0.014	0.019	36.0	53.0	24.0
K 5 E	Normalized	30	0.13	0.35	1.35	0.027	0.017	38.2	55.1	23.7
K 5 D	As Rolled	12.7	0.15	0.46	1.31	0.014	0.019	39.0	55.0	23.0

Table 2 Conditions of line-heating

Item	Condition
Nozzle of Gas Torch	2.8 mm ϕ
Pressure of Oxygen	6.0 kg/cm ²
Flow Rate of Oxygen	2.3 $\times$ 10 ³ l/h
Pressure of Acetylene	0.5 kg/cm ²
Flow Rate of Acetylene	2.0 $\times$ 10 ³ l/h
Height of Gas Torch (H)	20 mm
Distance between Gas Torch and Water Nozzle (D)	Min. 50 mm
Flow Rate of Water	2.3 l/min

線状加熱の要領：線状加熱条件としては、国内の各造船所で実施されている施工条件についてのアンケート結果¹⁾より Table 2 に示した条件を選定した。Table 2 中に示したようにガストーチと冷却水ノズルを台車に搭載し Straight Line Heating で行なった。加熱温度はガストーチの走行速度で調整し、水冷開始温度はガストーチと冷却水ノズルの間隔で調整した。温度計測は、加熱表面下 1 mm の位置に溶着された C. A. 熱電対と電磁オシログラフで行なった。したがって、加熱条件は表面下 1 mm の温度で制御した。すなわち、本試験の加熱温度ならびに冷却開始温度は、いずれも加熱表面下 1 mm での温度である。なお、表面下 1 mm の温度が 800°C の場合、キニス B 型輻射温度計による表面温度は約 900°C であった。加熱温度としては、角変形量の計測結果²⁾などから、板厚 30 mm の

場合は $650^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ の範囲を、また、板厚 12.7 mm の場合は $700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ の範囲を重点的に選んだ。また、加熱後の冷却条件として、自然冷却としての空冷と、強制冷却として、加熱後ただちに水冷する同時水冷および加熱後しばらく空冷してから水冷する途中水冷の場合を実施した。同時水冷の効果を上げるためには、ガストーチと冷却水ノズルの間隔をできるだけ接近させた方がよいが、接近させ過ぎると加熱焔の流圧により水が飛散し、加熱焔を定常状態に保つことが困難になる。したがって、本試験では加熱焔が安定でしかもガストーチと冷却水ノズル間隔が最小になる状態(約 50 mm , Table 2 参照)で線状加熱した場合を同時水冷とみなしたため、水冷開始温度が加熱温度より若干低くなることはやむを得ないことであった。したがって、板厚 30 mm の場合は、 $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 780^{\circ}\text{C}$ W.C. (加熱温度 900°C , 水冷開始温度 780°C), $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 700^{\circ}\text{C}$ W.C., $750^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 660^{\circ}\text{C}$ W.C., $700^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 615^{\circ}\text{C}$ W.C., $650^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 575^{\circ}\text{C}$ W.C., また、板厚 12.7 mm の場合は、 $950^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 770^{\circ}\text{C}$ W.C., $700^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 590^{\circ}\text{C}$ W.C., $650^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 555^{\circ}\text{C}$ W.C., $600^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 520^{\circ}\text{C}$ W.C. などが同時水冷条件である。

試験内容: 線状加熱部の切欠靱性を評価する試験法としては、一般に簡便な V-ノッチ・シャルピー衝撃試験が行なわれている。本試験においても、まず、この試験法により、加熱表層部の局所的靱性を把握した²⁾。さらに、厚板を対象にする場合、このような加熱表層部の局所的靱性を基準にして加熱部全板厚の脆性破壊強度を論ずることには疑問がある。このことは、K 5 D 銅(板厚 30 mm)について、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 700^{\circ}\text{C}$ W.C. の条件で線状加熱した場合の、加熱部板厚方向のビッカース硬さ分布、ならびに -7°C における V-ノッチ・シャルピー衝撃試験による吸収エネルギーの分布について示した Fig. 1 から、裏付けられよう。したがって、加熱部全板厚を対象にした大形脆性破壊試験を実施した。大形試験としては、脆性亀裂発生特性と伝播停止特性をできるだけ正確に把握するため、前者に対してはディープノッチ試験を、後者に対しては温度勾配型二重引張試験および ESSO 試験を実施した。

脆性亀裂発生試験片形状: 先に述べたごとく、ディープノッチ試験片(幅 400 mm , ノッチ長さ 120 mm)を製作・供試した。ただし、片面のみの線状加熱により曲げられたままの状態では試験を実施するのは困難であり、試験結果の解析も面倒になるので、供試材の表裏両面に線状加熱を行なって、平板試験片を製作・供試した。なお、ノッチは加熱線中央部に加工した。試験片形状を Fig. 2 に示す。

脆性亀裂伝播停止試験片形状: 亀裂伝播部幅 500 mm の標準二重引張試験片と、幅 400 mm の標準 ESSO 試験片を使用した。線状加熱部に脆性亀裂が伝播してきた場合の亀裂停止能力を定量的に把握することを目的にしたので、加熱線上を脆性亀裂が伝播するように残留応力のバランスを考慮して、表裏両面に各 3 条加熱し、ノッチは、中央の加熱線中央部に入れた。試験片形状を Fig. 3 に示す。

2.2 試験結果

各種条件で線状加熱加工された各供試材加熱表層部の V-ノッチ・シャルピー衝撃試験結果²⁾の、各種遷移温度(vT_{15} , vT_{35} , vT_{7E} , vT_{7S})ならびに 0°C における吸収エネルギー(vE_0)などを Table 3 および Table 4 に示す。

Fig. 1 Hardness and absorbed energy of Charpy V-notch ($800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 700^{\circ}\text{C}$ W.C., K 5 D, thickness ; 30 mm)

Fig. 2 Standard deep notch test specimen

Table 3 Results of Charpy V-notch transition temperature ${}_vT_{r15}$, ${}_vT_{r35}$, ${}_vT_{rE}$, ${}_vT_{rs}$
and absorbed energy at 0°C of line-heated zone
(K 5 A, K 5 D, K 5 E, thickness ; 30 mm)

Spec.	Line-Heating Condition	Transition Temperature (°C)				${}_vE_0$ (kg-m)
		${}_vT_{r15}$	${}_vT_{r35}$	${}_vT_{rE}$	${}_vT_{rs}$	
K 5 A	Original Plate	-38	-15	6	16	6.5
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625°C W.C.	5	40	46	34	1.9
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-1	35	44	37	2.1
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-19	12	27	31	3.6
	900°C A.C.	-26	-2	16	17	5.2
	850°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	8	40	47	38	1.7
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.	20	35	36	46	1.2
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	15	45	50	42	1.5
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-6	26	40	39	2.5
	800°C A.C.	-16	7	19	21	3.8
K 5 D	Original Plate	-61	-40	-27	-27	14.8
	1000°C A.C.	-57	-31	-17	-19	14.8
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 780°C W.C.	-26	-3	1	2	5.6
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625°C W.C.	-33	2	9	-6	4.5
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-45	-13	2	-5	6.3
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-54	-29	-8	-15	10.0
	900°C A.C.	-60	-38	-17	-19	14.8
	850°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-40	0	10	-3	4.8
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.	-31	-12	-2	2	7.2
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-28	-4	6	5	5.5
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-52	-29	-17	-14	12.1
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 400°C W.C.	-38	-23	-15	-20	14.2
	800°C A.C.	-70	-45	-20	-16	13.4
	750°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 660°C W.C.	-29	-10	-1	1	8.1
	700°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 615°C W.C.	-60	-26	-10	-6	11.9
	650°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-68	-35	-19	-14	14.4
K 5 E	Original Plate	-94	-60	-38	-35	17.7
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625°C W.C.	-39	-13	-3	-11	6.4
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-45	-14	3	-10	6.3
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-60	-31	-7	-6	9.0
	900°C A.C.	-57	-34	-8	-14	9.1
	850°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-44	-9	7	-2	5.8
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.	-35	-8	3	-6	5.6
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	-43	-9	4	-6	6.1
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-54	-21	0	-4	7.6
	800°C A.C.	-60	-32	-6	-11	9.6
	700°C A.C.	-87	-64	-36	-36	18.0

Table 4 Results of Charpy V-notch transition temperature ${}_vT_{r15}$, ${}_vT_{r35}$, ${}_vT_{rE}$, ${}_vT_{rs}$ and absorbed energy at 0°C of line-heated zone
(K 5 D, thickness ; 12.7 mm)

Line-Heating Condition	Transition Temperature (°C)				${}_vE_0$ (kg-m)
	${}_vT_{r15}$	${}_vT_{r35}$	${}_vT_{rE}$	${}_vT_{rs}$	
Original Plate	-46	-30	-27	-27	12.5
950°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 770°C W.C.	-18	11	0	3	3.4
800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625°C W.C.	-17	1	-1	-1	4.4
800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-32	-19	-14	-16	7.8
700°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 590°C W.C.	-35	-25	-23	-22	11.2
700°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	-39	-17	-11	-14	9.4
700°C A.C.	-42	-25	-19	-23	12.5
650°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 555°C W.C.	-36	-23	-18	-22	11.6
600°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 520°C W.C.	-39	-22	-15	-15	11.0

(1) Standard Double Tension Test Specimen

(2) Standard ESSO Test Specimen

Fig. 3 Standard double tension test and standard ESSO test specimens

また、各供試材素材板厚中央部より採取した直径 6 mm, Gauge Length 24 mm の丸棒引張試験片による 0°C ~ -196°C の温度範囲での降伏応力と温度との間の実験式は以下のごとくになった。

$$\text{K 5 A 鋼 (30)} : \sigma_y = 25.5 \cdot e^{95.0/T_K} \quad (1)$$

$$\text{K 5 D 鋼 (30)} : \sigma_y = 31.8 \cdot e^{83.9/T_K} \quad (2)$$

$$\text{K 5 E 鋼 (30)} : \sigma_y = 31.8 \cdot e^{83.9/T_K} \quad (3)$$

$$\text{K 5 D 鋼 (12.7)} : \sigma_y = 28.4 \cdot e^{83.9/T_K} \quad (4)$$

ただし、

σ_y = 降伏応力

T_K = 温度 (絶対温度) (°K)

次に各種条件で線状加熱加工された各供試材について実施した脆性亀裂発生試験結果を、Fig. 4~Fig. 7 に示す。

図中の S_i 値は次式により求めたものである。

$$S_i = \frac{\pi[f(r) \cdot \sigma_g]^2 C}{2E} \quad (5)$$

Spec.	No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
K5A	①	▲	Original Plate	$Si = 100.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	②	△	800°C△500°C W.C.	$Si = 25.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	③	△	800°C△500°C W.C.	$Si = 42.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	④	△	800°C A. C.	$Si = 56.7 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$

Fig. 4 Results of brittle fracture initiation test
(deep notch test
(K 5 A, thickness ; 30 mm))

Spec.	No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
K5E	①	●	Original Plate	$Si = 268.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	②	●	900°C△500°C W.C.	$Si = 119.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	③	○	800°C△500°C W.C.	$Si = 35.1 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	④	●	800°C△500°C W.C.	$Si = 119.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$

Fig. 6 Results of brittle fracture initiation test
(deep notch test
(K 5 E, thickness ; 30 mm))

ただし,

$$F(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi r} \left(\tan \frac{\pi r}{2} + 0.1 \sin \pi r \right)} \quad (6)$$

$$r = \frac{C}{B} \quad (7)$$

Spec.	No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
K5D	①	◆	Original Plate	$Si = 193.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	②	□	900°C△500°C W.C.	
	③	◇	800°C△500°C W.C.	$Si = 31.8 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	④	◇	800°C△500°C W.C.	
	⑤	◇	800°C A. C.	$Si = 193.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}}$
	⑥	×	650°C△575°C W.C.

Fig. 5 Results of brittle fracture initiation test
(deep notch test
(K 5 D, thickness ; 30 mm))

Spec.	No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
K5D	①	◆	Original Plate	$Si = 44.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
	②	◇	800°C△500°C W.C.	$Si = 250.1 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
	③	◇	700°C△590°C W.C.	$Si = 18.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
	④	◇	700°C△500°C W.C.	$Si = 44.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
	⑤	◇	700°C A. C.

Fig. 7 Results of brittle fracture initiation test
(deep notch test
(K 5 D, thickness ; 12.7 mm))

加熱部全板厚を対象にした脆性亀裂発生試験結果を要約すると次のごとくなる。

(1) 各鋼種とも、脆性亀裂発生特性は、冷却条件(空冷または水冷開始温度)によって大きく影響を受ける。

(2) 700°C~800°C に加熱して空冷した場合、脆性亀裂発生特性は、素材と同等かもしくは若干劣化する程度である。

(3) 700°C~900°C に加熱して 500°C 以下から水冷した場合、脆性亀裂発生特性は、素材と同等かもしくは若干劣化する程度である。

(4) 加熱後同時水冷した場合、加熱温度が 700°C~800°C になると脆性亀裂発生特性はかなり劣化する。加熱温度が 650°C 以下の場合、脆性亀裂発生特性におよぼす悪影響は認められない。

同様に、各種条件で線状加熱加工された各供試材について実施した脆性亀裂伝播停止試験結果を、Fig. 8~

Spec. No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
①	▲	Original Plate	$\ln K_{IC} = -3.46 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 18.28$
②	△	900°C A.S. 625°C W.C.	$\ln K_{IC} = -3.46 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 17.39$
③	△	800°C A.S. 700°C W.C.	$\ln K_{IC} = -3.46 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 17.51$
④	△	800°C A.S. 500°C W.C.	
⑤	△	800°C A. C.

Fig. 8 Results of brittle crack propagation-arrest test
(double tension test and ESSO test)
K 5 A, thickness ; 30 mm

Spec. No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
①	◆	Original Plate	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.96$
②	◆	900°C A.S. 625°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.28$
③	□	900°C A.S. 500°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.58$
④	◇	800°C A.S. 700°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.50$
⑤	◇	800°C A.S. 500°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.64$
⑥	◇	800°C A. C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.96$

Fig. 9 Results of brittle crack propagation-arrest test
(double tension test and ESSO test)
K 5 D, thickness ; 30 mm

Spec. No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
①	●	Original Plate	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 16.03$
②	○	900°C A.S. 625°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.37$
③	○	900°C A.S. 500°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.57$
④	○	800°C A.S. 700°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.80$
⑤	○	800°C A.S. 500°C W.C.

Fig. 10 Results of brittle crack propagation-arrest test
(double tension test and ESSO test)
K 5 E, thickness ; 30 mm

Spec. No.	Symbol	Line-Heat Condition	Empirical Formula
①	◆	Original Plate	$\ln K_{IC} = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.64$
②	◆	700°C A.S. 590°C W.C.	$\ln K_{IC} = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.05$
③	◇	700°C A. C.	$\ln K_{IC} = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.27$

Fig. 11 Results of brittle crack propagation-arrest test
(double tension test and ESSO test)
K 5 D, thickness ; 12.7 mm

Fig. 11 に示す。図中の K_c 値は次式により求めたものである。

$$K_c = f(r) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \quad (8)$$

ただし、

$$f(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi r} \tan \frac{\pi r}{2}} \quad (9)$$

$$r = \frac{C}{B} \quad (10)$$

C = 停止亀裂長さ (mm)

B = 試験片 (亀裂伝播部) の幅 (mm)

σ_g = 試験応力 (Gross Stress) (kg/mm^2)

加熱部全板厚を対象にした脆性亀裂伝播停止試験結果を要約すると次のようになる。

(1) 各鋼種とも、脆性亀裂伝播停止特性は、冷却条件 (空冷または水冷開始温度) によって大きく影響を受ける。

(2) $700^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ に加熱して冷却する場合、脆性亀裂伝播停止特性におよぼす悪影響は、空冷すると非常に小さいが、水冷の場合には、水冷開始温度が高いほど大きい。

さらに、参考までに、板厚 30 mm の K5D 鋼を 800°C に加熱後空冷した線状加熱加工材 (800°C A.C. 材) の二重引張試験片における表面の残留応力分布を Fig. 12 に示す。また、同様に亀裂伝播部中央付近での板厚方向の残留応力分布を Fig. 13 に示す。亀裂伝播部近傍の表面には、加熱線と直角方向にかなり大きな引張残留応力が認められる。また、板厚方向各点における加熱線と直角方向の残留応力は、表裏面では引張、板厚中央部では圧縮の残留応力になっている。

Fig. 12 Residual stress distribution of line-heated zone to 800°C and air-cooled (K5D, thickness; 30 mm)

Fig. 13 Residual stress distribution of line-heated zone to 800°C and air-cooled at plate section (K5D, thickness; 30 mm)

3 考 察

3.1 試験結果の検討

先に記した各供試材についての丸棒引張試験結果の (1) 式～(4) 式、脆性亀裂発生試験結果の整理に使用した (5) 式および Fig. 4～Fig. 7 中に記した実験式などを使用し、許容亀裂長さと脆性亀裂発生限界温度との関係を求め、Table 5 に示す。これらの値には、試験片中に存在すると考えられる線状加熱による残留応力は考慮されていない。

たとえ残留応力の影響を考慮したとしても、各供試材に施工した程度の線状加熱条件では、加熱部全板厚を対象にした脆性亀裂発生強度については、実用上問題ないといえよう。

一方、脆性亀裂伝播停止試験結果の整理に使用した (8) 式および Fig. 8～Fig. 11 中に記した実験式、さら

Table 5 Critical temperature of brittle fracture initiation vs. applied condition

Specification	Applied Stress Allowable Crack Length 1/2	16.0 kg/mm ²				8.0 kg/mm ²				1/2 σ_y			
		100 mm	60 mm	30 mm	10 mm	100 mm	60 mm	30 mm	10 mm	100 mm	60 mm	30 mm	10 mm
K 5 A (30)	Original Plate	—118	—136	—155	—175	—159	—169	—180	—193	—92	—110	—130	—153
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.	—35	—75	—111	—148	—118	—136	—155	—175	—8	—46	—83	—123
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	—75	—103	—131	—160	—136	—150	—165	—183	—46	—75	—104	—136
	800°C A.C.	—92	—116	—140	—166	—145	—157	—171	—187	—65	—89	—115	—143
K 5 D (30)	Original Plate	—141	—154	—168	—185	—171	—179	—188	—199	—105	—121	—139	—161
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	—55	—89	—121	—154	—127	—143	—160	—179	3	—39	—80	—121
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	—141	—154	—168	—185	—171	—179	—188	—199	—105	—121	—139	—161
	800°C A.C.	—141	—154	—168	—185	—171	—179	—188	—199	—105	—121	—139	—161
	650°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575°C W.C.	—141	—154	—168	—185	—171	—179	—188	—199	—105	—121	—139	—161
K 5 E (30)	Original Plate	—149	—161	—174	—189	—176	—184	—192	—202	—116	—130	—146	—166
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	—125	—141	—159	—178	—162	—172	—182	—195	—86	—106	—128	—152
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.	—63	—94	—125	—156	—131	—146	—162	—180	—7	—46	—84	—124
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	—125	—141	—159	—178	—162	—172	—182	—195	—86	—106	—128	—152
K 5 D (12, 7)	Original Plate	—130	—150	—169	—190	—174	—184	—194	—207	—101	—122	—144	—168
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	—72	—110	—142	—174	—135	—154	—172	—192	—44	—80	—115	—149
	700°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 590°C W.C.	—130	—150	—169	—190	—174	—184	—194	—207	—101	—122	—144	—168
	700°C A.C.	—130	—150	—169	—190	—174	—184	—194	—207	—101	—122	—144	—168

Table 6 Critical applied temperature vs. applied condition

Specifi- cation	Applied Stress	16.0 kg/mm ²		8.0 kg/mm ²		Temperature at NK's Requirement K_c Value
	Allowable Crack Length	3 m	1 m	3 m	1 m	
K 5 A (30)	Original Plate	19°C	13°C	3°C	-8°C	-5°C
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625°C W.C.	43	36	24	18	16
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.					
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	40	32	21	15	13
K 5 D (30)	800°C A.C.					
	Original Plate	-3	-10	-21	-28	-30
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625°C W.C.	18	9	-3	-11	-13
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	8	0	-12	-18	-21
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.	11	3	-9	-16	-19
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	5	-2	-14	-21	-22
K 5 E (30)	800°C A.C.	-3	-10	-21	-28	-30
	Original Plate	-5	-12	-23	-29	-15
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625°C W.C.	15	7	-6	-13	4
	900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.	9	1	-11	-18	-2
K 5 D (12.7)	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 700°C W.C.	2	-6	-17	-24	-8
	800°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500°C W.C.					
	Original Plate	-23	-31	-43	-49	-52
K 5 D (12.7)	700°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 590°C W.C.	-4	-12	-26	-34	-36
	700°C A.C.	-11	-20	-33	-40	-42

に、これらの K_c 値を用いて実際の構造物の脆性亀裂伝播阻止能力を推定する場合の関係式³⁾

$$C_{\text{eff.}} = 0.1 C + 190 \quad (11)$$

ただし、 $C_{\text{eff.}}$ = 標準二重引張試験あるいは ESSO 試験結果に対する有効亀裂長さ (mm)

C = 実際の構造物中を伝播した脆性亀裂の長さ (mm)

などを使用し、許容限界伝播停止亀裂長さとの関係を求め、Table 6 に示す。さらに、Table 6 中には、脆性亀裂伝播停止試験結果から求めた NK 規格要求 K_c 値⁴⁾

K 5 D 鋼 (30) : $K_c = 220 \text{ kg } \sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ ($\sigma = 16.0 \text{ kg/mm}^2$, $C = 60 \text{ mm}$)

K 5 E 鋼 (30) : $K_c = 439 \text{ kg } \sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ ($\sigma = 16.0 \text{ kg/mm}^2$, $C = 240 \text{ mm}$)

を満足する温度も示した。なお、K 5 A 鋼 (板厚 30 mm) および K 5 D 鋼 (板厚 12.7 mm) については、とりあえず K 5 D 鋼 (板厚 30 mm) の規格値を充用した。

実用上 K 5 A 鋼についての脆性亀裂伝播停止能力は、考慮の対象から除外することにする。したがって、K 5 D 鋼および K 5 E 鋼の脆性亀裂伝播停止能力について考えるならば、本試験において施行された程度の線状加熱条件では、使用応力が 8.0 kg/mm^2 ぐらいならば、限界温度はいずれも使用温度以下であり、実用上問題ないといえよう。

ただし、以上の検討には、供試試験片中に存在する線状加熱による残留応力の影響は考慮されていない。先に、Fig. 12 および Fig. 13 に示したごとく、亀裂伝播直角方向の残留応力は、表面には引張、板厚中央部には圧縮応力が存在しているので、試験結果の検討には残留応力の影響は考慮しないことにした。

3.2 靱性の評価

各種条件で線状加熱加工された各供試材について実施した、加熱表層部の V-ノッチ・シャルピー衝撃試験結果、加熱部全板厚を対象にした脆性亀裂発生試験結果および脆性亀裂伝播停止試験結果の総合評価について検討する。

V-ノッチ・シャルピー衝撃試験結果については、靱性を的確に示すと認められている 50% 脆性破面率遷移温

度 $\sqrt{T_{rs}}$ を評価の基準にする。

脆性亀裂発生試験結果については、使用応力 16.0 kg/mm^2 (室温降伏点の $1/2$)、許容限界亀裂長さ 20 mm (すなわち $C=10 \text{ mm}$) に対する脆性亀裂発生限界温度 ${}_{16}T_{IC=10}$ を評価の基準にする。

さらに、脆性亀裂伝播停止試験結果については、D級鋼およびE級鋼に対するNK規格要求値⁴⁾、すなわち、K5D鋼(板厚 30 mm) に対しては、使用応力 16.0 kg/mm^2 、停止限界亀裂長さ 60 mm 、換言すれば要求 K_{IC} 値 $=220 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ を満足する温度 ${}_{16}T_{AKC=220}$ を、また、K5E鋼(板厚 30 mm) に対しては、使用応力 16.0 kg/mm^2 、停止限界亀裂長さ 240 mm 、換言すれば要求 K_{IC} 値 $=439 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ を満足する温度 ${}_{16}T_{AKC=439}$ を評価の基準にする。なお、K5A鋼(板厚 30 mm) および K5D鋼(板厚 12.7 mm) については、とりあえず、K5D鋼(板厚 30 mm) の場合と同一の基準を充用することにした。

本試験に供試した程度の材料では、一般に、以上の各基準温度に対するバラツキは、 $\sqrt{T_{rs}}$ では 20°C 程度以下、 ${}_{16}T_{IC=10}$ 、 ${}_{16}T_{AKC=220}$ 、 ${}_{16}T_{AKC=439}$ などでは 10°C 程度以下と考えられる。したがって、線状加熱により、以上の各基準温度がバラツキの範囲を越えて高温側に变化した場合には、明瞭な悪影響が認められたものと判断されよう。

各種条件で線状加熱加工された各供試材についての $\sqrt{T_{rs}}$ 、 ${}_{16}T_{IC=10}$ 、 ${}_{16}T_{AKC=220}$ 、 ${}_{16}T_{AKC=439}$ などを求め Fig. 14~Fig. 17 に示す。

Fig. 14~Fig. 17 より、各鋼種によって多少の相違はあるが、概略下記ことが判明した。すなわち、加熱温度を A_{c1} 変態点以上の $800^\circ\text{C}\sim 900^\circ\text{C}$ 程度にしても、加熱後空冷するか、 A_{r1} 変態点以下の 500°C 程度から水冷を開始すれば、線状加熱による明確な靱性劣化は認められないといえよう。また、加熱温度を A_{c1} 変態点以下の $600^\circ\text{C}\sim 650^\circ\text{C}$ 程度にすれば、加熱後ただちに水冷しても明確な靱性劣化は認められないと言えよう。

4 結 論

船体用 50 キロ級高張力鋼 A 級鋼 (K5A 鋼, 板厚 30 mm)、D 級鋼 (K5D 鋼, 板厚 30 mm および 12.7 mm) および E 級鋼 (K5E 鋼, 板厚 30 mm) に対し、ガストーチにより加熱表面下 1 mm の位置の温度で $1,000^\circ\text{C}$ 程度までの種々の温度に加熱後、冷却条件を変えた線状加熱を施こして、加熱部全板厚を対象に脆性亀裂発生特性および伝播停止特性を実験的に把握した。

結論として、脆性亀裂発生特性および伝播停止特性に明瞭な悪影響をおよぼさない線状加熱作業条件としては、下記の条件が望ましいことが判明した。

(1) 加熱後空冷する場合は、加熱温度を $800^\circ\text{C}\sim 900^\circ\text{C}$ まであげても良い。

(2) 加熱後ただちに水冷する場合は、加熱温度を $600^\circ\text{C}\sim 650^\circ\text{C}$ 程度におさえること。

(3) 加熱後しばらく空冷してから水冷

Fig. 14 Results of various fracture mechanical tests (relationships between $\sqrt{T_{rs}}$, ${}_{16}T_{IC=10}$ and ${}_{16}T_{AKC=220}$) (K5A, thickness ; 30 mm)

Fig. 15 Results of various fracture mechanical tests (relationships between $\sqrt{T_{rs}}$, ${}_{16}T_{IC=10}$ and ${}_{16}T_{AKC=220}$) (K5D, thickness ; 30 mm)

Fig. 16 Results of various fracture mechanical tests (relationships between $vTrs$, $16T_{ic=10}$ and $16T_{ak=439}$) (K 5 E, thickness ; 30 mm)

Fig. 17 Results of various fracture mechanical tests (relationships between $vTrs$, $16T_{ic=10}$ and $16T_{ak=220}$) (K 5 D, thickness ; 12.7 mm)

靱性に及ぼす組立工程における加工の影響（その2）—線状加熱による熱塑性変形ならびに局部的靱性劣化について—，日本造船学会論文集第133号，（昭48年6月）。

- 木原 博，金沢 武，池田一夫，前中 浩，木下 勝，永元隆一，矢島 浩：“クラックアレスターの有効性について（第2報）”，日本造船学会論文集第124号，（昭43年12月）。
- 日本海事協会船体部：“船体用高張力鋼材の衝撃試験の規格と船体構造への使用区分”，日本海事協会鋼船規則，（昭和40年）。

する場合は，加熱温度を800°C～900°Cまであげても良い。ただし，水冷開始温度は500°C以下とする。

すなわち，50キロ級高張力鋼の線状加熱は，冷却条件をコントロールすることにより，鋼板の靱性に実用上悪影響を与えることなく，現在実施されている条件を緩和し，加熱温度を高め，水冷による強制冷却などにより曲り効率，作業能率を向上させることが判明した。

本研究は，日本造船学会鋼船工作法研究委員会第1分科会において研究問題としてとりあげられ，日本造船研究協会第111研究部会において実施されたものである。ここに，両委員会の関係各位より戴いたご示唆および熱心なご協力に対して厚く感謝する次第である。また，実験の遂行に大いに努力して戴いた長崎大学工学部構造工学科久保武技官ならびに三菱重工(株)長崎研究所 日野隆博氏，川辺智信氏，石川兼保氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 三菱長崎造船所：“船体構造に対する線状加熱についてのアンケート取纏め”，日本造船学会鋼船工作法研究委員会第1分科会資料，No.69-1-15，（昭和44年）。
- 木原 博，栖原二郎，黒川常夫，片岡繁夫，修行 稔，中島正樹，矢島 浩，深江達郎：“鋼板の