

技術報告

UDC 621.785.616 : 539.4.016.3

マルテンサイト変態過程における鋼の塑性と
焼割れに対する考察*

利岡 靖継**・深川 宗光***・雑賀 喜規***

Plasticity of Steels during Martensite Transformation and
Quench Cracking in Heat Treatment of Steel

Yasutsugu TOSHIOKA, Munemitsu FUKAGAWA, and Yoshinori SAIGA

Synopsis:

By applying an impact tensile load to steels at various stages of the transformation from austenite to martensite, the plasticities of low alloy steels during quenching determined in terms of the reduction of area. The results obtained are as follows.

1. The plasticity of the steels decreased rapidly as the martensitic transformation proceeded, and recovered somewhat after the completion of transformation, thus exhibiting a minimum.
2. The minimum plasticity depended on the carbon content of the steel, decreasing with increasing the carbon content and becoming nil at 0.47%C.
3. By examining those plasticity values in regard to the theoretically evaluated internal quench stress values, the quench cracking tendency of a steel could be anticipated, and the safety limit for water quenching could be established. This was successfully applied to medium carbon low alloy steels of various sizes and weights.

(Received June 6, 1972)

1. 緒 言

鋼の焼割れは熱処理に従事する者にとつて一度は経験するほどありふれた現象であるにもかかわらず、その原因についてはロールに関する下田¹⁾の研究以外に定量的解析はほとんど行なわれていない。工業製品の焼割れに対して定性的な考察からだけでもその防止対策を十分に行ないうることが個々の研究例²⁾に述べられているとおりであるが、質量効果の低減などを考える場合、焼割れの原因を定量的に解析し、焼割れの可能性をあらかじめ予測することは今後必要になつてくるものと考えられる。鋼の質量効果を少なくするには、合金成分を増量する方法と焼入の冷却能を大きくする方法の2つがあるが、前者は素材費の上昇を招くので著者は後者の方法、すなわち水焼入れを積極的に採用することにより鋼の強靱化を行なうことを考え、その条件として焼割れの原因を解析することを試みた。

鋼を焼入ると冷却中に熱歪と変態歪を生ずるが、冷却中は鋼の温度分布が一様でないので、断面位置におけ

るこれらの歪の発生は時間的にずれ、内部応力発生の原因となる。焼入状態で鋼が塑性変形することができなければ内部応力の値が鋼の破壊強さを越えたとき焼割れとなるであろう。しかし、塑性変形することができるならば弾性限以上となると予想される応力は塑性変形によつて吸収され、焼割れとはならないであろう。言葉をかえれば、焼割れを生ずるのは予想される内部応力が高く、かつ、この応力を塑性変形によつて吸収するに十分な塑性変形能を鋼が持っていない場合であるということができよう。著者は焼割れの原因をこのように考え、すでに丸棒の焼入応力に対する理論解析の結果を報告³⁾したが、ここでは、焼割れのもう一つの要素である鋼の塑性変形能についての実験結果を述べ、これらの結果から予測した焼割れの可能性と工業製品に予測を適用した場合の焼割れの結果を報告する。

* 昭和47年6月6日受付

** 石川島播磨重工業(株)

*** 石川島播磨重工業(株) 工博

Table 1. Chemical compositions (%) and austenite grain size numbers of steels tested.

Steel	No	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Austenite G. S. No*
SNC-2	58	0.31	0.33	0.66	0.016	0.005	2.59	0.77	—	5
SCM-3	52	0.35	0.21	0.82	0.007	0.005	—	1.07	0.23	6
SCM-5	53	0.47	0.22	0.74	0.007	0.012	—	1.07	0.17	5
SCM-5	63	0.45	0.25	1.00	0.018	0.004	—	1.05	0.24	5
SNCM-1	54	0.37	0.30	0.67	0.021	0.001	1.80	0.76	0.24	4.5
SNCM-5	55	0.30	0.20	0.40	0.027	0.028	3.15	2.68	0.63	6
SNCM-8	65	0.42	0.23	0.76	0.014	0.012	1.73	0.80	0.24	7
SNCM-9	56	0.48	0.29	0.74	0.022	0.009	1.78	0.80	0.24	5
SNCM-26	57	0.15	0.35	1.11	0.017	0.005	2.92	1.75	0.49	6

* Approximate values.

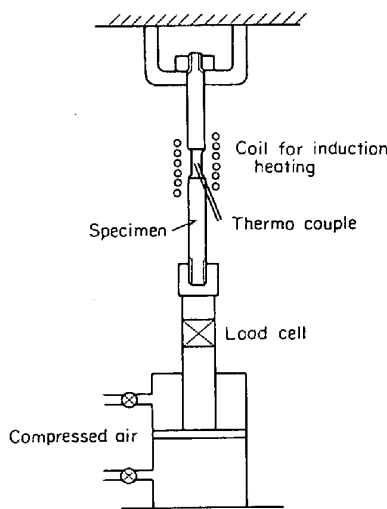


Fig. 1. Schematic profile of test apparatus.

2. 実験方法

供試材は工場の端材を用い、25 mm 径に鍛伸したのちスエーシングにより 9 mm 径の棒とし、900°C×30 min の焼ならし焼もどしを行ない、平行部直径 3.3 mm 長さ 10 mm 全体長さ 130 mm の引張試験片を加工した。供試材の化学成分と JIS 滲炭法によるオーステナイト粒度を Table 1 に示す。なお、オーステナイト粒度は熱処理粒度によるべきであるが、滲炭法によつたので参考値である。試験片平行部中央に温度測定のための Pt-PtRh 熱電対を点法で溶接したのち、Fig. 1 に示す衝撃引張試験機にセットした。試験片平行部を中心に約 25 mm の範囲を誘導加熱によつて所定のオーステナイト化温度に 1 min あるいは 10 min 保持し、その後空冷した。オーステナイト化温度から室温に至る冷却の任意の温度で衝撃引張を行ない、そのときの絞りの値をもつて鋼の塑性変形能とした。破断荷重はロードセルを介して求め、破断に要した時間は 0.4~1 sec であり平均歪速度は 25~10 mm/sec であつた。なお、Table 1 に示す成分の鋼を用いた理由は、試験の目的がマルテンサイト変態過程

における絞りの変化を調べることにあつたため、空冷程度の冷却において中間変態を生じない程度の焼入性を持つた鋼を選んだという実験上の都合にすぎない。

3. 実験結果

Table 1 の鋼についてオーステナイト化温度から室温に至る各温度での絞り変化を Fig. 2 に示す。いずれの鋼においてもオーステナイト状態では 80% 前後のすぐれた値を示すが、マルテンサイト変態の開始とともに絞りは急激に低下しはじめ、マルテンサイト変態終了温度付近で最低値に達したのちやや回復している。破断強さは絞りの値とは全く逆の傾向であり、オーステナイト状態では小さく、マルテンサイト変態の進行とともに急増し最大値に達したのちやや低下している。オーステナイト状態における絞りの値に対しては炭素その他の合金成分はほとんど影響していないが、マルテンサイト状態での絞りは成分の影響が大きい。Fig. 2 から絞りの最低値だけを取り出し、鋼の炭素量との関係で表わすと Fig. 3 のような結果が得られた。すなわち、炭素量の増加とともにマルテンサイトの絞りは小さくなり 0.47% C でゼロとなる。この実験範囲内において絞りの最低値 (ϕ_{min}) と炭素量の間には次の関係がみとめられた。

$$\phi_{min} = 156(0.47 - \%C)$$

したがつて、炭素量が 0.47% 以上の鋼においてはマルテンサイト状態で塑性変形によつて降伏点以上と予想される応力を吸収することは不可能であり、焼割れを防止するには鋼の焼入応力を過大にしないことが必要となる。0.47% C 以下の場合には、含有炭素量に応じて塑性変形を行なうことが可能であるので、焼入応力が過大であつてもかならずしも焼割れに到るとは限らない。

4. 水焼入における焼割れの考察と応用

以上述べたマルテンサイト変態過程における鋼の塑性と焼入れ内部応力の計算結果から焼割れの検討をつぎの

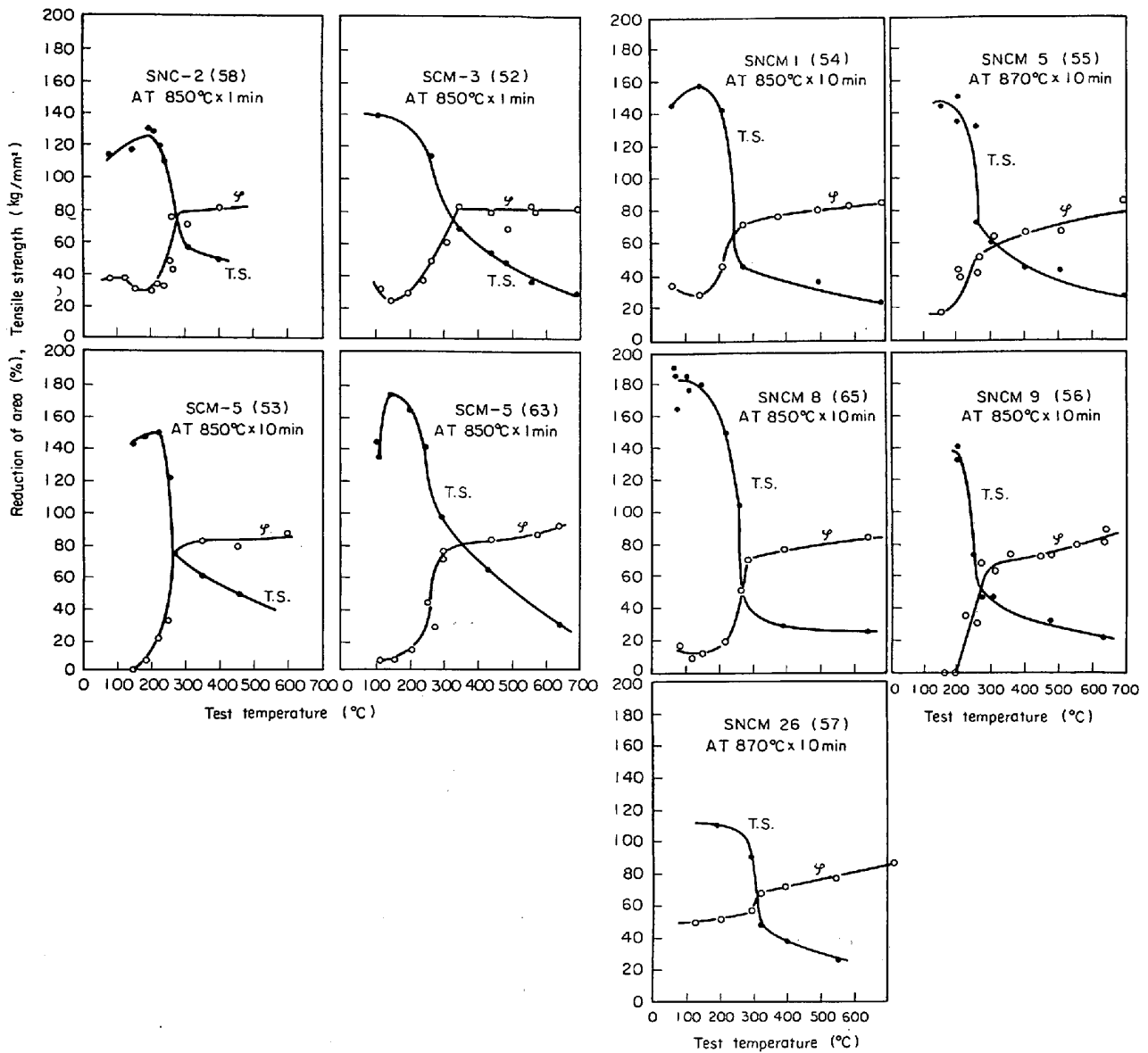


Fig. 2. Reduction of area (ϕ) and tensile strength of steels (T.S.) during transformation from austenite to martensite.

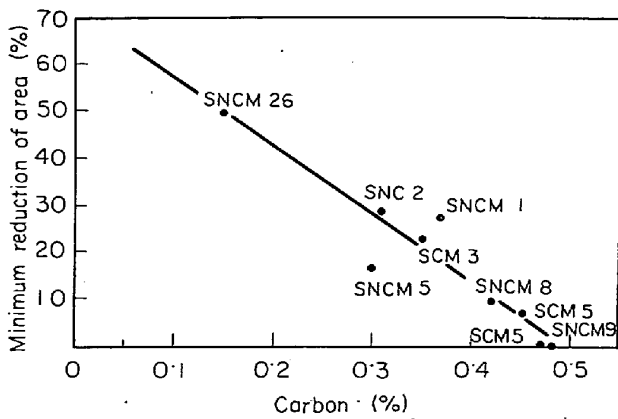


Fig. 3. The relationship between minimum reduction of area and carbon content in steels as transformed to martensite.

ように行ない、焼割れ発生有無の予測を行なつた。

1) 焼割れを生ずる応力

マルテンサイト変態過程における鋼の破壊強さは、Fig. 2によれば引張強さの最大で 110 kg/mm^2 (SNCM 26) ~ 180 kg/mm^2 (SNCM 8) である。直径 25 mm の鋼を水焼入れしてマルテンサイト一相にした場合の内部応力は、H. BÜHLER⁴⁾の残留応力から推測しても、また著者の計算結果³⁾においても中炭素低合金鋼の場合の引張応力の最大値は $60 \sim 80 \text{ kg/mm}^2$ と予想される。それにもかかわらず炭素量が 0.4% 以上の場合は経験上焼割れを発生しうることから、実体における鋼の破壊強さは試験片における引張強さほど高くないと考えられる。焼入れ中の過渡的內部応力は実測不可能であるため、焼割れ

Table 2. Mechanical properties of the steel of photo. 1.

Heat treatment	Position	Direction	σ_y kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	El %	R. A %	σ_y/σ_B %	Impact	
								kgm	Brittle %
850°C× 3 hr W. C	Surface	Long.	72.6 65.0	90.7 84.5	20 18.8	60 49	80.0 77.0	1.4 1.4	84.4 84.4
		Tang.	64.5 63.8	85.3 83.7	15 21.2	38.5 44	82.3 76.0	1.4 1.1	84.4 87.5
580°C× 6 hr A. C	Center	Long.	63 63	84.2 87.4	20 17.5	47 39	75.0 72.4	0.6 0.5	100 100
		Tang.	— —	— —	— —	— —	— —	0.6 0.7	100 100

* 0.41 C, 0.30 Si, 0.67 Mn, 0.20 P, 0.18 S, 1.04 Cr, 0.20 Mo Diameter: 258 mm

Table 3. Mechanical properties of the steel of photo. 2.

Heat treatment	Direction	σ_y kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	El %	R. A %	σ_y/σ_B %	Impact kgm
850°C×2 hr W.C	Long.	73.0 73.8	89.3 90.5	21.2 20.0	61.0 62.5	82.0 81.6	6.4 8.9
		Radial	63.6 63.6	76.7 82.0	6.2 12.5	13.0 22.0	— 77.5

* 0.35 C, 0.29 Si, 0.72 Mn, 0.14 P, 0.08 S, 1.07 Cr, 0.17 Mo Diameter: 180 mm

を生じるときの応力をはつきり述べることはできないが、安全を見て 50 kg/mm² と仮定した。

2) 焼入中の鋼の内部応力

焼入中の鋼の内部応力は、成分が与えられた場合、鋼の寸法と冷却方法から定まる過渡的温度分布および焼入組織によつて与えられる。完全焼入の場合、表面：引張、中心：圧縮、不完全焼入の場合、表面：圧縮、中心：引張の応力分布となるが、マルテンサイトとベイナイトの混合組織に焼入れられた場合は両者の中間のような応力分布となり、予想される内部応力の引張最大値は 50 kg/mm² 内にほぼおさまる。したがつて内部応力の面からはマルテンサイト一相になる寸法範囲と中心部にフェライトを析出する寸法範囲を焼割れに対して危険域と判断した。

3) 鋼の塑性

マルテンサイトとベイナイトの混合組織に焼入れても水焼入を採用した場合、鋼の寸法が大きいと表面直下の高い引張力が発生することが予想される。過大な応力に対してどの程度の絞りがあれば焼割れに至らずにすむかという点はきわめてむずかしいので、暫定的に過大応力 10 kg/mm² につき 5% の絞りがあれば焼割れには至らないと仮定した。

以上のように、焼入組織と内部応力および鋼の塑性の面から、水焼入を行なつたときの焼割れに対する適用鋼種と寸法範囲の安全域を定め、段落付きの品物を含む約 100 t の丸棒鋼材の水焼入を行なつた。鋼材の主体部で焼割れを生じたものは Photo. 1 に示す 1 件だけであり、Photo. 2 に示すような軸端の角が欠ける現象が数件生じただけであつた。これらの焼割れ品の焼入れ焼もどし後の機械的性質をそれぞれ Table 2 と Table 3 に示す。Photo. 1 に対しては衝撃値が 0.5~1.4 kgm (JIS 4号) といちじるしく低く、Photo. 2 に対しては軸方向の絞り 61% に対して半径方向の絞りは 17% 前後と低く、焼入状態での機械的性質を推測して前者は脆



Photo. 1. Appearance of fracture surface of a medium carbon low alloy steel that was fractured brittle.

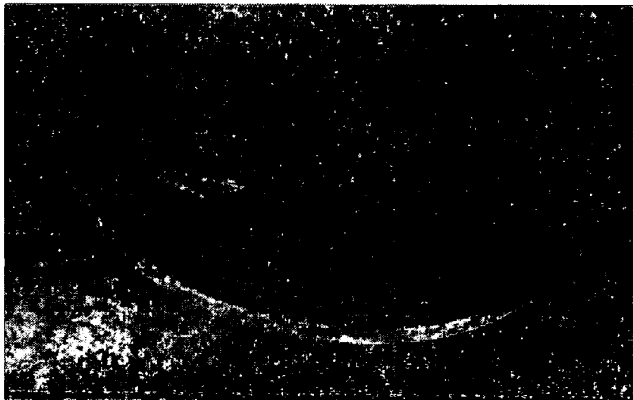


Photo. 2. Appearance of corner cracking in a steel bar due to insufficient ductility in the radial direction.

性破壊、後者は半径方向の絞りの不足が原因であると考えられ、標準の材質を満足していなかったことによるものと思われる。

5. 考 察

鋼の焼割れについては CHAPMAN と JOMINY⁵⁾による鋼の成分と焼割れ感受性の関係の実験が知られており、工業的にはいろいろの防止方法が行なわれていることは周知のとおりである。過去の経験や冷却緩和剤の開発あるいは焼入方法などの検討によつて現実の焼割れに対する対策がそれぞれ企てられているが、焼割れの本質を定量的に検討することは、実際的な焼割れ防止対策を樹立する上で系統的な考え方を示し、いたずらに焼割れの発生を心配することなく、積極的に急冷を採用して鋼の強靱性を最大限に発揮させることにも役立つであろう。著者の研究は丸棒だけを対象としたものであり、複雑な形状

の鋼に対して適用できない面もあるが、計算技術の進歩により将来複雑な形状に対しても解析可能となることと確信している。

6. 結 言

著者は鋼の質量効果の低減を水焼入れの採用によつて行なうことを考え、その条件として、焼割れの原因を定量的に把握することを試みた。焼入中に生ずる鋼の内部応力についてはすでに報告したので、この報告では焼入中の鋼の塑性変形能の変化とこれに及ぼす成分の影響を述べた。鋼の塑性変形能は実験の都合上引張試験の絞りから求めた。得られた結果は次のようであった。

1. 焼入過程の鋼の絞りの値はオーステナイト状態では成分によらず 80% 前後の高い値である。マルテンサイト変態の進行とともに絞りは急減し M_f 点付近で最小値に達したあとわずかに回復する。

2. マルテンサイト状態での絞りの最低値は鋼の炭素量が増加するとともに低下し、0.47% C でゼロとなる。

焼入応力と以上の実験結果を応用して焼割れに対する安全範囲を予測して丸棒の水焼入れ約 100 t 行ない、焼割れに対する安全範囲の予測は工業的にも適用できることを確認した。

文 献

- 1) 下田, ほか: 塑性と加工, 6 (1965) 59, p. 719
- 2) 「熱処理」焼割れ特集, 7 (1967) 3,
- 3) 利岡, ほか: 鉄と鋼, 57 (1971) 14, p. 2230
- 4) H. BÜHLER and A. ROSE: Arch. Eisenhüttenw., 40 (1969) 5, p. 411
- 5) R. D. CHAPMAN and W. E. JOMINY: Metal Progress, Sep. 1953, p. 67