高炭素マルテンサイトの振り特性におよぼす焼戻の影響

安 倍 駿 一 郎*

Shun-ichiro Abe : Effect of Tempering on the Torsional Properties of a High Carbon Martensite. The author has carried out torsion impact tests for a carbon tool steel to study the toughness of highly hardened tool steels that are usually hard and poor in ductility in the service condition. According to these tests, it was shown that the curve of relations between the impact value and the tempering temperature has a high peak near 200°C and a deep dip near 250°C in the tempering at temperatures lower than 300°C. In order to more comprehensively investigate these phenomena, static torsion tests were performed and the results were compared with those of the previous torsion impact tests.

As a result, it has been clarified that (1) the tempering temperature producing a peak of the impact value slightly elevates with increase of the austenitizing temperature, (2) that the changes in the impact value are mainly influenced by the change of plastic deformation work defined by dividing the area under torque-twist angle curve, and (3) the toughness of hardened tool steel is significantly affected not only by the tempering temperature but by the tempering time.

Thus it has been decided that the static torsion test as well as the impact torsion test is very effective as a toughness testing method for hardened tool steel in which strength is more essential than ductility.

(Received May 6, 1964)

I. 緒 言

通常鋼の靱性は各種の衝撃破断エネルギーで表示されている。ところがこれらの衝撃値は破断までの変形曲線下の面積すなわち破断に要した仕事量と密接な関係にある。

したがって高強度低柔軟性の材料と低強度高柔軟性の材料とは単一の表示値になり、衝撃値だけでは靱性の内容が明らかでない。切削や金型用の工具のように高硬度したがって強さや弾性的諸性質を重要な要素としている焼入工具鋼でも単に衝撃値だけではその靱性の内容を充分把握することはむづかしい。幸い相当高い硬度範囲でも振り衝撃によるとかなり敏感に高硬度工具鋼の熱処理による衝撃値の変化が認められる⁽¹⁾⁽²⁾。しかしこの衝撃値の変化は柔軟性の変化により得られたものか強度の変化により現われたものかを実際に使用される工具鋼の低温焼戻範囲で明らかにしておくことが大切である。そして作業工具のように僅かの永久変形すなわち寸法変化を許せるものと切削や金型用工具のように僅少の永久変形をも極度に嫌うようなものとは同じ硬度水準にする熱処理操作を適当に変えねばならぬ。この目的のため今回は同一粗材で全く等しい熱処理履歴の焼入試験片につき、衝撃振り試験と静振り試験の結果

の比較検討を行なった。つぎに以前の実験⁽¹⁾では炭素含量に応じた異なったオーステナイト化や冷却条件で焼戻温度により変わる振り衝撃値の変化を求めたが、その際 200°C 付近のピークの現われる焼戻温度にある変動を認めたので今回は同一炭素量の工具鋼でオーステナイト化温度のみを変えて、はたしてこの 200°C 付近の衝撃値のピークの現われる焼戻温度がどのように変化するかを見きわめ前報⁽¹⁾のあいまいさを確かめる目的で実験を進めた。一方、Aston⁽³⁾は数種の構造用鋼についてある温度で定温長時間焼戻しを行なったものは、短時間焼戻しにくらべる相の粒界析出のため等しい抗張力水準で相当に脆化現象のあることを報告している。そこで炭素工具鋼の低温焼戻しでもその焼戻時間により脆性が現われるものかどうかを調べる実験もあわせ実施したので、それらの概要を報告する。

II. 実 験 方 法

1. 試 験 片

19 mmφ に鍛延されて予め球状化焼鈍をされた炭素工具鋼 (JIS; SK 3) の棒材から Fig. 1 に示す形状寸法に試験片を切り出して用いた。その化学組成を Table 1 に示す。

Table 2 の (a) および (b) はこれらの試片の試験目的に応じた熱処理方法を示す。試験片の焼入加熱は各焼入温度に応じて 31 本ずつ同時に 600°C の流気式加熱炉で 15 min 間

* 大阪府立工業奨励館堺分館 (Department of Sakai, Industrial Research Institute, Osaka Prefecture, Sakai)

(1) 安倍: 本誌, 28 (1964), 129.

(2) 安倍: 本誌, 28 (1964), 137.

(3) J.L.Aston: J. Iron and Steel Inst., 192 (1959), 377.

予熱後 25 KW の塩浴炉で 10 min 間オーステナイト化し、50°C の焼入油中で充分に攪拌冷却した。

焼戻しは 840°, 880°, 920°C 焼入の 3 連の試片の中から同一温度の焼戻しをする共通試片 12~15 本を採り各焼戻

Fig. 1 Dimension and shape of torsion specimen used in this investigation.

Table 1 The chemical composition of material.

C	Si	Mn	P	S
1.00	0.29	0.45	0.010	0.010

Table 2 Heat treatment and number of parallel specimens.

Preheated	Austenitized	Quenched	Tempered at and for 60 min	Parallel specimen	Sum up
at 600°C for 15 min	at 840°C, 880°C, or 920°C, for 10 min	into agitated oil at 50°C	100°C	4, 4, or 4	12
			150	4, 4, " 4	12
			175	4, 4, " 4	12
			200	4, 4, " 4	12
			225	5, 5, " 5	15
			250	5, 5, " 5	15
			300	5, 5, " 5	15
Preheated	Austenitized	Quenched	Tempered at 150°C and 200°C	Parallel specimen	Sum up
at 600°C for 15 min	at 840°C for 10 min	into agitated oil at 50°C	15 min	3 and 3	6
			30 "	3 " 3	6
			60 "	3 " 3	6
			120 "	3 " 3	6
			240 "	3 " 3	6
			480 "	3 " 3	6

しの温度につき同時に 1 時間焼戻した。ただし 200°C までは油槽、225~300°C は低温塩浴槽中行なつた。200°C 焼戻しまでは衝撃振り、静振りとも 2 本ずつの平行試片を用い、また 225~300°C 焼戻しでは衝撃振りには 3 本、静振りには 2 本ずつの試験片を用いた。一方焼戻し時間の影響を調べる試片の準備も前述同様できるだけ焼入焼戻しを各条件で同時処理し、熱処理効果の不均一性を最小にするよう努めた。各試片は熱処理後試験部を 00 のエメリーペーパーで手仕上し、さらに青棒パフでほとんど鏡面まで琢磨した。その後円柱部中央の 4 方向につき 30 kg 荷重のビッカース硬度計で表面硬度を測定し、それらの平均値を求めた。

2. 試験機

静振りは振力の繰返し負荷方法によるもので、この試験機では最大 20° までの振れ角を測ることができる。毎回の振力の追加は 1.2 kg-m ずつであり、振り距離 30 mm に対する振れ角は 1/100° まで目測されるように円弧ラック

と、これにより回転されるピニオンの軸にとりつけた指針により拡大されている。

衝撃振り値は回転勢車が試片破断によりその回転数をおとす瞬間の落差を勢車により駆動される小型発電機の電圧降下として電磁オンシロにとらえ計算より求めた。

以上の試験機はいずれも著者の設計で K.K. 恵美須屋工具製作所の製作になる自家製の試験機⁽¹⁾である。その試験値の再現性についてはすでに前報⁽²⁾に報告した。したがって平行試片の数により両試験値の精度範囲は推測されよう。

III. 実験結果およびその検討

1. 焼入および焼戻条件による振り衝撃値の変化

Fig. 2 は打撃瞬間の試片表面の切線方向の打撃速度が約

Fig. 2 Effect of quenching temperature on the relation between torsion impact values and tempering temperature and on hardness for 1.00% carbon tool steel.

0.5 m/sec で、840°, 880, 920°C 焼入後 100°~300°C 間の種々の温度で焼戻した試片を衝撃振り破断したときの焼戻温度とともに変化する衝撃値を示す。同図に各試片群の平均硬度の変化も示した。焼入温度がどの群の試片も Acm 線を超えているので、各群の焼戻温度に伴う硬度変化はほとんど類似しているのに衝撃値の走行は著しい変化を示している。思うにもしこれら 3 種の焼入温度による衝撃値の変化が焼入直前のオーステナイト粒度の影響だけであるとすれば高温焼入ほど衝撃値は単に小さくなり、焼戻温度についての衝撃値の走行はほぼ相似でなくてはならぬ。しかしここでは焼入温度があがるにつれて衝撃値の回復する焼戻温度は高温側に移動している。この傾向は 1% C 鋼につき同じような実験をした Palmer と Luerssen⁽⁴⁾ の報告にも見出されるがその理由は明らかでない。ただいわゆる靱性を得るための焼戻しに 150°~200°C の温度を、焼入時のオーステナイト化や冷却条件に無関係に用いることには反省の余地があるように思われる。

つぎにそれでは焼戻温度につき現われる Fig.2 に見られるような衝撃値の走行は、工具鋼の靱性すなわち強さと柔軟性のいずれの変化により高低を示すかを調べるため、衝撃試片と同時準備した試片を静振り試験に付した。その振力-変形角曲線を Fig.3 に示す。各曲線はいずれも 2 本の試

Fig.3 Angular deformation curves obtained by static torsion tests.

(4) F.R.Palmer and G.V.Luerssen: Tool Steel Simplified. Carpenter Steel Co. (1948), 564.

片の平均変形曲線であり、硬度の変化も便宜上同図に示した。図中●印および×印はそれぞれ各試片の破断点および平均降伏点を示す。この降伏点はある振力を追加したとき試片が常温のクリープをおこしはじめる点をもつてした。各群の変形曲線は便宜上原点を 1° ずつ右に移してある。

Photo.1 の a, b, c はそれぞれ 840°, 880°, 920°C 焼入し、100°~300°C 間の温度で焼戻した試片を静振り破断した破片の外観を示している。c の全部と b の 3 本は剪断型の破断を示し、振力、振れ角ともに小さいことが特徴である。他は強靱型の破断を示し、いづれも振れ角、振力大きい。

3 群の試片の焼戻しによる硬度変化および硬度数はおおよそ類似しているにかかわらず、それぞれの変形曲線群にはかなりの変化が認められる。いまこの変化を数値化するため、これらの変形曲線を基準として最大剪断応力、降伏力、剛性率、全および弾性変形角を求めた。また平面計および計算により破断までの全および弾性変形仕事を求めた。これらの値を焼戻温度につき図示すると Fig.4, 5, 6 のようになる。Fig.4 から最大剪断応力は焼戻温度が上るにつれ次第に改善され、振り降伏力は 250°C 焼戻しまで向上し、これ以上の温度で焼戻すと低下する傾向が見られる。剛性率は焼入温度に無関係に 200°~225°C の焼戻しで本来の鋼のそれに回復される。Fig.5 によると 840°C 焼入の場合全変形角が 200°C 焼戻しで最大値を 250°C 焼戻しで最小値を示しているに反し、弾性変形角が 200°C 焼戻しで最小を示している。換言すると塑性変形角が第 1 段階の焼戻しで増大し、第 2 段階 焼戻しの中期 250°C で最小値を示し、爾後の焼戻しで再び増大している。880°C 焼入では 250°C 焼戻しするとき 920°C 焼入では 300°C 焼戻しではじめて塑性変形角が増大している。Fig.6 の 2 本の走行線の差、すなわち塑性変形仕事の焼戻温度による消長も Fig.5 によく似ている。X 線や電子回折法および膨張計による最近の炭素鋼の焼戻過程の研究によるとその焼戻動作は 3 段階にわけられている。

Lement と Averbach および Cohen⁽⁵⁾⁽⁶⁾ はこの 3 段階の焼戻しでおこる顕微鏡組織の変化を研究し、炭素鋼の焼戻過程におけるこれら 3 段階の主要な特色の便利な総括を提出している。これに準拠して弾性変形仕事は全変形仕事の走行とは相反するような増減の説明が可能なのである。すなわち 840°C 焼入試片の破断までの弾性変形仕事が 200°C で最低を示すのは、焼入れたままの高炭素マルテンサイトが低炭素マルテンサイトと ε 炭化物になる第 1 段階焼戻しのためのマルテンサイトの低炭素化によるはげしい弱体化と、ε 炭化物の析出硬化による強化との合成効果によるある弾性的性質の劣化(塑性変形仕事ははげしく増大し、合成の効果として全変形仕事は増大している) 250°C で増大するのは第 2 段階焼戻しによる残留オーステナイトのマル

(5) B. S. Lement, B. L. Averbach and M. Cohen : Trans.ASM, **46** (1954), 851.

(6) B. S. Lement, B. L. Averbach and M. Cohon : Trans.ASM, **47** (1955), 291.

テンサイト化による再強化 (ただし破壊までの塑性変形仕事が増加したために衝撃値が下り脆化といわれることもあ

消長は Fig.2 の 840°C 焼入のときの振り衝撃値の焼戻温度についての变化と定性的に非常によく類似していること

(a)
840°C O.Q

(b)
880°C O.Q

(c)
920°C O.Q

Photo.1 Appearance of specimens fractured by the static torsion tests. ($\times 9/14$)

る), 300°C で低下するのは第3段の焼戻すなわち低炭素マルテンサイトと ϵ 炭化物が反応して α とセメンタイトとを生成する一種のパーライト化や、微視的には転位密度固溶元素の減少などによる軟化のためと考えられる。しかも3段階の組織変化は2段階のおこる温度範囲と重複しておこるため衝撃値や静的試験による靱性試験の結果に定説を欠く原因をつくっているようである。さらに 840°C 焼入の場合 Fig.6 の破断までの全変形仕事と弾性変形仕事との差すなわち破断までの塑性変形仕事量の焼戻温度についての

が判る。したがって振り衝撃値の大小は主として試片の破断までの塑性変形仕事の大小により左右され、強さや弾性的諸性質にはあまり影響されぬように思われる。

2. 焼戻時間と振り衝撃値の変化

Fig.7 は 150°C と 200°C の2種の温度で焼戻時間を変えた試片の振り衝撃値を焼戻しの時間につき図示したものである。各衝撃値はいずれも2本の試片の平均値で硬度の変化も併記してある。焼戻時間により硬度は僅かしか変わらぬが、衝撃値においては 150°C 焼戻して4時間付近に、

200°C 焼戻しで 2 hr 付近に最大値が認められた。このような傾向は Klinger ら⁽⁷⁾ が Ni-Cr の構造用合金鋼に

例して改善されているに反し、最大剪断応力(破壊係数)は 150°C の焼戻しでは 4 hr に、200°C 焼戻しでは 1 hr に最

Fig.4 Effect of quenching and tempering temperature on maximum shear stress, yield strength, and modulus of rigidity in static torsion test.

Fig.5 Effect of quenching and tempering temperature on total and elastic twist angle upto fracture in static torsion test.

ついて Rc 50 以上の硬さにつき提出している。150°~200°C 焼戻温度は実際の部品の焼戻しに 応用される 付近の温度であるから、再び衝撃値の定性的内容を知るため、前の衝撃試片と全く同じ粗材、熱処理の試片につき静振り試験をした。Fig.8 はそれらの変形曲線群で●印×印は 前項と同じ意味の記号である。これらの曲線を基準として再び各機械的性質を数値化したのが Table 3 に示してある。Table 3 より判ることは、降伏力がおよそ時間の対数に比

Fig.6 Effect of quenching and tempering temperature on total and elastic deformation work upto fracture in static torsion test.

Fig.7 Effect of tempering time on torsion impact values.

大値がある。

200°C 焼戻しするとき振り破断係数と振り降伏力の比は 1~2 hr 焼戻しするとき最大で、これ以上長時間 焼戻すとこの比は次第に小さくなり、破壊に対する安全性は低下するようである。炭素工具鋼製の工具においては一般に 150°~200°C の温度で品物の用途や寸法に応じて 1/2~2 hr の焼戻しが実施されて、硬度のみで調整されているが、硬さ

(7) L.J.Klinger, W.J.Barnett, R.P.Frohmborg and A.R.Troiano: Trans.ASM, 46 (1954), 1557.

の規準に制約されてごく短時間とか、あまりに長時間の焼入れは靱性の面から回避されねばならぬ。塑性変形仕事も

れぬようである。

IV. 総 括

炭素工具鋼の焼入温度や焼戻しの温度、時間とその靱性の変化を検べるために、まづ衝撃振り値を測り、この値の焼戻温度や時間による変化の消長が、強さと柔軟性との変化のいずれに起因するものであるかを調べた結果は、本試験の範囲内でつぎのように要約される。

(1) 300°C 以下の低温焼戻しにおいて、炭素工具鋼の振り衝撃値は、焼戻温度の上昇につれ硬度のゆるやかな低下に反してはげしい上昇下降の変化を示す。すなわち 840°C 焼入のとき 200°C 焼戻付近にピーク、250°C 焼戻付近に谷を示す。しかもこの 200°C 付近の衝撃値のピークの現われる焼戻温度は、焼入温度が高いほど高温側に移る。

(2) 焼戻時間を変えることで振り衝撃値と静振りで得られる諸々の機械的性質は良く対応する。そして 150°C の定温焼戻しでは 4 hr 付近に靱性値のやや大きくなるところがある以外は時間による著しい変化は認められぬが、200°C の焼戻しでは 1~2 hr の焼戻しで著しく靱性の増大があり、これ以上長い焼戻しはむしろ硬度の低下にもかかわらず脆化の傾向がはげしい。

Fig. 8 Torque-twist angle curves obtained by static torsion test of specimens tempered for different time between 15 min and 480 min at 150°C and 200°C after quenching at 840°C.

Table 3 Effect of tempering time on several mechanical properties appearing in static torsion tests.

Tempering temp. (°C)	Tempering time (min)	Max. shear stress (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Modulus of rigidity ($\times 10^3$ kg/mm ²)	Twist angle Degree per 30 mm dist.			Deformation work kg. m. degree		
					Elastic	Plastic	Total	Elastic	Plastic	Total
150	15	83.2	60.4	6.66	4.90	0.80	5.70	10.2	2.1	12.3
	30	104.0	72.3	7.33	5.65	0.90	6.55	15.5	2.3	17.8
	60	124.0	72.3	6.78	7.20	1.60	8.80	22.3	6.9	29.2
	120	171.8	96.1	7.15	9.85	2.05	11.90	42.4	12.8	55.2
	240	204.0	108.0	7.97	10.38	2.97	10.35	52.9	22.4	75.3
	480	181.8	120.0	7.33	10.00	2.30	12.30	45.6	16.7	62.3
200	15	96.1	84.2	6.85	5.52	0.60	6.12	13.0	0.4	13.4
	30	120.0	96.1	7.19	6.75	0.60	7.35	20.2	0.9	21.1
	60	>251.2	108.0	7.45	>12.66	>9.00	>21.66	>80.0	>85.5	>165.5
	120	231.0	132.0	7.71	11.65	5.20	16.85	67.9	46.1	114.0
	240	227.5	143.9	7.64	12.15	3.25	15.40	69.5	29.7	99.2
	480	184.0	155.9	6.85	10.50	3.90	14.40	48.4	31.2	79.6

200°C で 2 hr 以上の焼戻しでは小さくなり、振り衝撃値の変化とよく対応され得る。

以上 2 組の比較試験の結果より、一般に衝撃値は主として塑性変形仕事の大きさに左右され、高硬度工具鋼の靱性の重要な因子である弾性的性質や強さには僅かしか影響さ

(3) 振り衝撃値は主として破断までの塑性変形仕事の大小により左右され、その材料の強さや弾性的性質には僅かしか影響されない。そこで高硬度鋼の靱性比較には強さや弾性的性質を現わす静振り試験をも併用する必要がある。