ロックウェル・クォータロード硬さ試験について (第3報)*

——伸銅薄板の最小限界厚さ——

真 下 美 佐 男**

On the Rockwell Quarter Load Hardness Test (3rd Report)
—The Minimum Thickness Limit of Copper Alloy —

Misao MASHIMO

This paper presents the minimum specimen thickness limit (T_{min}) of copper alloys (brass, 2 kind of phosphor bronze and nickel silver). Standardized hardness blocks were tested by HRB•HRBQ, HR 30 T•HR 30 TQ scales, errors of the similarity in hardness were found to be lower than 1% (2nd report). To test thinner specimen, scales are extended to HR 15 T•HR 15 TQ. Hardened steel spot anvil (SSA) and diamond spot anvil (DSA) are used, both spot diameters are 4 mm. Criteria of the T_{min} are: (1) Difference of hardness measured with SSA, DSA is lower than ± 0.1 hardness unit. (2) The bulge or mark appears on underside is barely visible. (3) The elastic deformation of SSA is reasonable that is 0.2-0.9 hardness unit depending on the specimen thickness. This test uses specimens which are extracted from usual factory products. They were hardened by cold rolling and hardness were changed by working ratio, heat treatment, tension annealing, etc. Therefore the hardness of these copper alloys generally vary throughout thickness of specimens and the thickness is decreased by etching (HNO_3) and polishing, the hardness changes. The values in the test results should be taken as average ones. The hardness test data are fitted with second or third order polynomials by least square method. The above 5 materials are divided into 2 groups. (1) brass, phosphor bronze (Bs, PB) and (2) Nickel silver (NS) in the relation between T_{min} and hardness. The hardness for the same T_{min} differs significantly. HRB 3.7-7.3, HR 30 T 1.8-3.1, HR 15 T 1.8-3.0, in middle and high hardness range (H, EH, SH). But the difference between polynomials within the same group is lower than 1.0 unit (except phosphor bronze ≤ 1.4).

Key words: minimum specimen thickness limit (T_{min}), HRB•HRBQ, HR 30 T•HR 30 TQ, HR 15 T•HR 15 TQ, steel spot anvil, diamond spot anvil, criterion of T_{min}

1. 結 言

ロックウェル硬さ試験方法ならびに同クォータロード硬さ試験方法(荷重を1/4, 硬さ目盛1のくぼみ深さを1/2)により硬さ基準片を測定し, HRBとHRBQ, HR 30 TとHR 30 TQの値を比較した結果, HRとHRQは実用上十分な小差で, 硬さの相似性が成立(硬さ値が一致)したことを報告した¹⁾²⁾.

クォータロード硬さ試験方法を提唱した目的は薄板, 薄層, 小形試料の硬さ測定を可能にするためである. 硬さスケールにHR 15 T, HR 15 TQ(以下HR 15 T, HR 15 TQと呼ぶ)を加え, 伸銅所の日常の薄板製品の妥当な硬さの得られる最小限界厚さ(以下 T_{min} と呼ぶ)を求める実験を行つたので報告する.

2. 実験装置, 実験条件および試料

2.1 硬さ試験機

既に報告した¹⁾ロックウェル硬さ試験機, 同クォータロード硬さ試験機(スーパーフィシャル硬さ試験機を含む)を使用した.

2.1.1 硬さ試験機の改良

クォータロード・スーパーフィシャル硬さ試験機(ARK-MQS)の硬さ指示計は, 尾崎製作所製のリニアゲージD-10 sである. ダイアルゲージ型で, スピンドルとその上下の軸受,

スピンドルに取り付けたスケールの回り止めピンの案内溝との摩擦のため, 基準荷重が変動しやすい. 保守に時間を取られるのと, 負荷速度の差によっても変動する. 摩擦を避けるため, 軸受はスピンドルが触れないように内径を大きくし, ピンは取り外す. スピンドルの上下に2枚の平行板ばねを取り付けて, 案内するよう計画, 尾崎製作所に製作を依頼し, 使用した(図1). 付加おもり(0.55 kg)を外した荷重1.96 Nは長期にわたって安定している.

豊田工機製の荷重検出器に使用する負荷軸を支えていた, 1方向・上下2枚の平行板ばねを, 直角・4方向, 合計8枚とし, 約5 Nの予圧を与えて使用した.

測定値の再現性が確実に(図2), 付加おもりを取り付けた, 基準荷重7.35 Nの精度は0.3%以内になった.

日本工業規格³⁾のHR 15 Tの試験荷重の精度は, 硬さ目盛

Fig. 1 Suspension of the spindle of detector (linear gauge) is 2 parallel plate spring

* 原稿受付 平成5年6月28日

** 正 会 員 元湘南工科大学(藤沢市辻堂西海岸1-1-25)

Fig. 2 Record of ARK-MQS minor load calibration
7.35 N {0.75 kgf} is 1.96 N + additional weight 0.55 kg¹⁾

Fig. 3 Lapping jig

80 と -50 の 2 か所で測定するよう規定されている。D-10 s に取り付けられた平行ばねにより、2 か所の荷重値の差は 0.37 N 増加した。本実験の使用範囲は、HR 30 TQ が 65~35, HR 15 TQ は 82~60, それぞれ 40, 70 で検定器の定数に一致するよう調整した。検定器の誤差を加えても試験荷重精度は 0.15% 以内である。

2.1.2 圧子用鋼球直径精度

既に報告した試験²⁾に使用した圧子用鋼球は、呼び径 0.789 3 mm に対し $-5.3 \mu\text{m}$ で、誤差が大きく硬さ測定値の補正を必要とした。今回は天辻鋼球製作所より、直接供与されたもので、その誤差は $+0.5 \mu\text{m}$ 、硬さ値の誤差は 0.05 以内である⁴⁾。鋼球は硬さ測定を行うごとに、表面が荒れてくる。硬さスケール、試料の材質が変わる点で、測定回数が 150 を超えた時は、新しいものと交換した。

2.1.3 スポットアンビル

直径 4 mm のダイヤモンドスポットアンビル（以下 DSA と呼ぶ）と、これに合わせて、スポット直径 4 mm の焼入れた鋼のスポットアンビル（以下 SSA と呼ぶ）を使用した。ダイヤモンド自身の、ヤング率（以下 Y_m で表す）は鋼の約 5 倍⁵⁾である。DSA はダイヤモンドを焼結合金で、円筒形に包んで焼結し、焼入れた台金の穴に挿入した後、平面に磨いてある。本実験では焼結合金を含む DSA、鋼製の SSA の使用状態での弾性変形量を測定し、その差を求めておく必要がある。

HRB 約 100 の硬さ基準片を使用、基準・試験の両荷重をかけても動かないように、基準片のほぼ中心をアンビルの上に乗せ、同一点の硬さ測定操作を 25 回以上繰り返す。SSA, DSA 共に、試験荷重下の指示計の読みは 103.2、基準荷重に戻した時は 129.2 であった。数回に 1 回 0.1 変化する程度で、両者の弾性変形量には差がないと考えられる。試料の厚さ t が $T_{\min}$ より小さくなると、硬さ測定のくぼみによる、試料裏面の「ふくらみ (bulge)、光点 (mark)」(以下 BUM と呼ぶ) が明りょうになる。アンビルと試料の間には摩擦力が働くから、SSA の面は平坦であると同時に、鏡面であることが必要である。図 3 にラッピング用のジグを示す。鋳鉄製の定盤の上で 1 600 番のコランダム粉を灯油で溶いて、ジグ面と共にラッピ

Fig. 4 Flatness of anvil

ングした後、水を含んだバフ用フェルトに酸化クローム粉を付けて磨いた。図 4 は後述の平面度検査器で撮影した、SSA, DSA 面の干渉じまで、凹凸を判定しやすいように傾けた。しまの間隔は、 $0.273 \mu\text{m}$ の高さの差を表す。DSA の表面は球面である。SSA のしまの幅に変動がある。深さ $0.1 \mu\text{m}$ 程度の条痕の存在が予想され、100 倍の光学顕微鏡で数条の線が確認された。

2.2 平面度検査器

溝尻光学工業所製のフィゾー式平面度検査器 FT-75（以下 FT-75 と呼ぶ）は SSA, DSA の平面度、 t の小さい ($T_{\min}$ の 70% 以下) 試料の硬さを測定した時、SSA 面に、くぼみ発生の有無の検査、BUM の観察、撮影、 $T_{\min}$ の判定の補助に使用した。光源は水銀のスペクトル e ライン、波長 $\lambda = 0.546 \mu\text{m}$ である。SSA, DSA 面、小形試料用に直径 25 mm、硬さ基準片、標準寸法の試料用に直径 60 mm の穴をあけた試料台を準備した。付属のカメラはポラロイドである。

2.3 試料の種類

試料の材質、硬さ、板の厚さ（以下 t で表す）は、(1) 七三黄銅板 (C 2600 P-0, 1/2 H, EH) $t = 0.19 \sim 2.4 \text{ mm}$ 8 種、(2) りん青銅板 (C 5191 P-0, 1/2 H, EH) $t = 0.18 \sim 2.0 \text{ mm}$ 13 種、(3) ばね用りん青銅板 (C 5210 P-1/2 H, EH, SH) $t = 0.16 \sim 1.6 \text{ mm}$ 13 種、(4) 洋白板 (C 7521 P-0, 1/2 H) $t = 0.8 \sim 2.0 \text{ mm}$ 10 種、(5) ばね用洋白板 (C 7701 P-1/2 H, H, EH, SH) $t = 0.17 \sim 2.0 \text{ mm}$ 10 種。伸銅所から日常の製品の、幅 80 mm 以上、長さ 400 mm 以上の板を 2 枚ずつ提供された。何ら特別な処理は行っていない。表面に塗布剤を施した材料があるので、すべてエメリーペーパー（以下 E ペーパーと呼ぶ）の 2 000, 3 000 番で磨き、酸化クロームで仕上げた。

2.4 硬さ試験の条件

- (1) 試験室は恒温、恒湿 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, $50 \pm 5\%$
- (2) 試験荷重の負荷速度²⁾ HRB 70 で $10 \mu\text{m/s}$
- (3) 荷重保持時間 10 秒²⁾

としたが、試料の材質により、負荷が完了した点が不明確で、完了後も 10 秒間に $0.7 \sim 0.8$ 進むもの (C 5191-P, C 7521 P) がある。指示値の動きと、保持時間に充分注意して操作した。

3. 実 験

3.1 試料の準備

1) 試料の標準寸法を図 5 に示す。測定棒 ($A' \times B'$) は試料の硬さ測定のくぼみの間隔を、その直径の 10 倍取れるように、また HRTQ は基準荷重が小さく、アンビルの直径も小さいので、試料とアンビルの密着が保たれるように定めた。場所により硬さの差が大きい試料があるので、枠内を 9 区画に等分した。区画 C は材料を裁断する際の変形部分を避けるためと、本試験前に硬さ測定と $T_{\min}$ を判定する試験を行う場所である。

Fig. 5 Dimensions of specimen

2) 試料の t を小さくするには 0.5 L のビーカーに入れた硝酸の溶液に、試料を縦に漬け、エッチングした。液温、試料の材質の変化があるから、2~3 分で t の減少が 0.01~0.02 mm になるよう硝酸の濃度を調節した。

3.2 硬さ測定と T_{min} の判定

3.2.1 硬さ測定の順序

次項、3 項目の条件の 1) を満たす試料は図 5 の 9 区画を S_1, D_1, D_2, S_2 の順に、また 9 点の測定はカードをきって順序を定め、くぼみによる試料の変形の影響を平均化した。測定値は使用アンビル SSA, DSA に従ってそれぞれ H_s, H_d 、試験荷重下の読みを H'_s, H'_d で表す。 H_s, H_d, H'_s, H'_d の各 18 点の平均値、標準偏差 σ 、 $H_s - H_d$ 、 $H'_s - H'_d$ を求めた。

3.2.2 T_{min} を決定する 3 項目の条件

1) くぼみによる裏面の BUM がかすかに見えること

区画 C で試料の硬さ値を 2 点求めて平均し、 T_{min} を予想する。 t がこの値の約 10% 増になるまでは、1 回に t で 0.05~0.06 mm エッチング、E ペーパー 700 番での磨きを繰り返す。次に 1 回に 0.01~0.02 mm エッチング、E ペーパー 1000 番で磨きを繰り返す。BUM がかすかに現れたら E ペーパー 2000, 3000 番で磨き、酸化クロムで仕上げる。この t が T_{min} である。BUM をさがすには、試料裏面を光源の方向に対し斜めに向け、反射光で観察する。 t が小さく、BUM も小さい時は、5, 6 倍のルーペを使用し、FT-75 で確認する。

1 枚の試料内の t の変動は、 $t \leq 0.3$ mm が < 0.005 mm、 $0.3 < t \leq 1.5$ mm が < 0.010 mm、 $t > 1.5$ mm が < 0.015 mm とした。HRTQ 用の試料を磨く時は、加工硬化層の深さが、2 μ m 以下になるよう、冷却剤としてアセトンをかけながら行った⁶⁾。

BUM の一例を図 6 に示す。 $t = 2.4$ mm の C 2600 P-0 を 33 mm $\times$ 33 mm に裁断、2.1.3 項と同じ方法、ただし指で押さえてラッピングし、中央の平坦部の (0.273 μ m 以内) の最小幅を 10 mm 以上に仕上げ、反対面の中央に HRB くぼみを 1 点打った時のラップ面の変形を FT-75 で撮影した干渉しまである。この段階ではルーペを使用しても、BUM は認め難い。この試料の T_{min} は 2.38 mm である。

2) $|H_s - H_d| \leq 0.1$

BUM のふくらみ、大きさ、明りょう度の判定には主観が入りやすいので、客観的な条件として採用した。各材料の 0 材は硬さ値の σ が大きく、0.11~0.12 なるこ

a) lapped back surface b) Deformation of the left

Fig. 6 Interference pattern of back surface of 2600 P-0, $t = 2.4$ mm caused by one indentation on center of surface. Dimensions of specimen are 33 mm $\times$ 33 mm (HRB 23.2), G_1, G_2 are ghost of optical system

とがある。 $T_{min} = 2, 30$ mm の HRB 30.9, $T_{min} = 1.10$ mm の HRB 100.9, $T_{min} = 1.00$ mm の HR 30 T 41.0 のくぼみ深さ h は、HR の定義により硬さ目盛で計算すると、それぞれ 99.1, 29.1, 51.0 と大きな差がある。6 種類のスケール、硬さ値により差の大きい h に対し 0.1 の重みの差は大きい。判定の基準として零を目標にした。0.1 以内としたのは、0.1 が硬さ指示計の最小目盛で、精度の面 (HRTQ の 1 目盛は、0.05 μ m) から限度である。BUM がかすかな時は上述の一部の例外を除き、この条件は必ず満たされている。アンビルの影響の一つは試料面の滑り抵抗である。試料の t の大きさが T_{min} の前後の時、アンビル面に接触した試料裏面の変形に対する摩擦係数は、鋼よりダイヤモンド面の方が小さいから $H_s \geq H_d$ 、この時点で DSA 面の硬さの影響がどの程度か不明である。試料の t が T_{min} より大きく、BUM が消える最小の t の硬さ値が真の値であるなら、 T_{min} の硬さ値より 0.2~0.8 高くなる。例えば C 5210 P-SH, HRBQ $T_{min} = 0.48$ mm は 101, 4 ($n = 18$, $\sigma = 0.11$), $t = 0.51$ mm は 101.8 ($n = 18$, $\sigma = 0.08$), その差は 0.4 である。

3) 硬さ試験荷重下のくぼみによる SSA の局部的弾性変形量 (以下 A_e と呼ぶ) が適性値であること

SSA と DSA の使用時の弾性変形量は 2.1.3 項において HRB の試験荷重下で差は 0.1 以内であった。試験荷重下の指示値 H'_s は試験機の機枠、圧子、くぼみ、くぼみ下の試料、

Fig. 7 Transition of $H_s, H_s - H_d, A_e$. Specimens are cut off from same sheet and area. Thickness is decreased by etching

SSA 及びその面の局部的弾性変形の総計である。DSA のダイヤモンドの Y_m は鋼の約5倍であるから、くぼみ下の試料による局部的弾性変形を無視すれば、 $(H_d' - H_s')$ よりくぼみ深さ値の差（硬さ値の差、 $H_d - H_s$ ）を引いた値が、SSA 面の局部的弾性変形量 A_e である。 A_e の機能は、真の T_{min} の確認にある。 t/T_{min} が1より小さくなると、アンビル効果の差により再び $H_s - H_d \leq 0.1$ になる。例えばC 7701 P-H の HRB (図7-1) である。BUM は明りょうで、 A_e は0.45と大きい。C 2600 P-EH の HR 15 T (図7-2) は0.1 の内で変動している。両者共に A_e 値、BUM の明りょう度により T_{min} を判定した。本実験に使用した材料の Y_m は、洋白が約150 GPa、その他の材料は124 GPa 前後である、50% 以上の冷間圧延率でも、総体的には110~150 GPa の範囲⁷⁾ でその差は少ない。 A_e は硬さくぼみ下の球状の塑性、弾性変形域と、アンビル平面との接触により発生する。試料の Y_m の差が少なければ、 A_e は大略 t に逆比例する。

4. 実験結果と考察

4.1 HR, HRQ の各スケールの硬さと T_{min} の関係表

実験の結果を表1に示す。各スケールの残差二乗和 (E_s で表す)、 A_e の範囲、中心値の概数を付記した。

1) 最小二乗法により硬さを T_m (T_{min}) の多項式で表し、HRB (6 群)、HRBQ (5 群) は三次式、他は試料の種類から4 群が限度の場合が多いので二次式とした。

2) 通常 t の大きい、硬さの低い材料は、表裏面と芯の硬さの差が大きいから、HR の T_{min} は、同じ硬さ値の HRQ の T_{min} の2 倍より大きい。

3) (Bs, PB) グループと (NS) グループに分割した。加工硬化の大きい高い硬さの試料では、同じ T_{min} に対する硬さ値は (Bs, PB) が (NS) より高く、HRB は3.5~7.3、HR 30 T は1.8~3.1、HR 15 T は1.8~3.0 と大きい。その差が T_{min} の中間で大きくなるが、両者ともひずみ硬化指数 (n 値) の差によるものと考えられる。加工硬化されて n 値の小さい材料は、圧子下の接触面にひずみが集中し、その深さは浅い⁸⁾。従って同じ硬さでも T_{min} は小さくなる。

4) 測定値と式により計算した値との差 (ΔH_s で表す) の最大差はC 5191 P の一部の ± 1.4 を除くと、(Bs, PB), (NS)

Table 1 Minimum specimen thickness limits

Es; Sum of residual squares
Unit of A_e ; Hardness number
1-1 HRB, HRBQ

Min. thickness mm				Hardness (Bs, PB)		Hardness (Ns)	
HRB	A_e	HRBQ	A_e	HRB	HRBQ	HRB	HRBQ
1.00	0.28-0.41	0.50	0.37-0.73				101.1
1.10		0.55		100.9	100.8	97.4	97.3
1.20		0.60		99.2	98.9	93.5	93.2
1.30		0.65		96.2	95.8	89.3	88.9
1.40		0.70		92.2	91.6	84.9	84.5
1.50	0.24	0.75	0.34	87.2	86.5	80.3	79.6
1.60		0.80		81.5	80.6	75.3	74.6
1.70	0.22	0.85	0.32	75.1	74.0	70.2	69.4
1.80		0.90		68.1	67.0	64.8	64.2
1.90		0.95		60.8	59.5	59.1	58.2
2.00	<0.19	1.00	<0.30	53.4	52.0	53.2	53.2
2.10		1.05		45.8	44.3		
2.20		1.10		38.2	36.8		
2.30		1.15		30.9	29.4		
2.40		1.20		23.9	22.4		
E_s				1.19, $n=6$	1.60, $n=5$	0.52, $n=4$	1.29, $n=4$

$$\begin{aligned} \text{HRB (Bs, PB)} &= 222.4999 T_m - 144.6574 T_m^2 + 23.3704 T_m^3 \\ \text{HRBQ (Bs, PB)} &= 449.2232 T_m - 589.3309 T_m^2 + 192.1048 T_m^3 \\ \text{HRB (NS)} &= 123.8191 - 10.2069 T_m - 12.5614 T_m^2 \\ \text{HRBQ (NS)} &= 125.8651 - 25.5411 T_m - 48.1394 T_m^2 \end{aligned}$$

1-2 HR 30 T, HR 30 TQ

Min. thickness mm				Hardness (Bs, PB)		Hardness (Ns)	
HR 30 T	A_e	HR 30 TQ	A_e	HR 30 T	HR 30 TQ	HR 30 T	HR 30 TQ
0.50	0.45-0.80	0.25	0.39-0.68	85.7	85.3	83.9	83.3
0.60		0.30		80.5	80.0	77.9	77.2
0.70		0.35		74.4	73.7	71.4	70.6
0.80	0.40	0.40	0.37	67.5	66.6	64.4	63.8
0.90		0.45		59.6	58.5	57.0	56.6
1.00	<0.38	0.50	<0.35	50.8	49.5	49.1	49.0
1.10		0.55		41.0	39.6		
1.20		0.60		30.4	28.8		
E_s				1.03, $n=5$	0.46, $n=4$	0.13, $n=4$	1.96, $n=4$

$$\begin{aligned} \text{HR 30 T (Bs, PB)} &= 97.8004 - 1.3805 T_m - 45.6597 T_m^2 \\ \text{HR 30 TQ (Bs, PB)} &= 98.4276 - 6.9410 T_m - 181.8075 T_m^2 \\ \text{HR 30 T (NS)} &= 106.7952 - 33.9582 T_m - 23.7553 T_m^2 \\ \text{HR 30 TQ (NS)} &= 109.3194 - 87.1629 T_m - 66.8597 T_m^2 \end{aligned}$$

1-3 HR 15 T, HR 15 TQ

Min. thickness mm				Hardness (Bs, PB)		Hardness (Ns)	
HR 15 T	A_e	HR 15 TQ	A_e	HR 15 T	HR 15 TQ	HR 15 T	HR 15 TQ
0.30	0.49-0.66	0.15	0.52-0.94		94.1		92.6
0.35		0.175		93.0	92.8	92.1	91.5
0.40		0.20		91.6	91.2	90.5	90.0
0.45		0.225		89.8	89.1	88.6	88.1
0.50	0.43	0.25	0.38	87.6	86.7	86.4	85.8
0.55		0.275		85.0	83.8	83.9	83.2
0.60		0.30		82.0	80.7	81.0	80.2
0.65	< 0.40	0.325	< 0.34	78.6	77.1	77.8	76.9
0.70		0.35		74.9	73.1	74.3	73.1
E_s				0.30, $n=5$	0.38, $n=5$	0.35, $n=5$	1.21, $n=4$

$$\begin{aligned} \text{HR 15 T (Bs, PB)} &= 92.2786 + 29.0666 T_m - 76.9910 T_m^2 \\ \text{HR 15 TQ (Bs, PB)} &= 93.9886 + 46.3701 T_m - 302.7535 T_m^2 \\ \text{HR 15 T (NS)} &= 93.3712 + 19.1988 T_m - 66.3651 T_m^2 \\ \text{HR 15 TQ (NS)} &= 91.8524 + 49.3159 T_m - 293.7822 T_m^2 \end{aligned}$$

共に ± 1.0 、測定誤差を加えても、 ± 1.5 以内である。

5) 図7-1, 2 を別の視点から見る。 t/T_{min} を0.8にした時、7-1 は $t=0.95$ mm、7-2 は $t=0.16$ mm、内挿法で計算した

Fig. 8 Comparison of minimum thickness limits between the test result and ASTM, DIN, ISO

H_u の低下は約0.80, 0.55である。試料の硬さの比較は、ピッカース硬さ試験機の荷重を、くぼみ深さが $t/10$ になるよう調節し、HV値を測定した（ T_{min} のHR値に相当する）結果、 205.2 ± 0.3 , 201.0 ± 0.5 , 有意差はない。 H_u 低下の原因は t の減少である。 $0.8 \leq t/T_{min} < 1.0$ ならば、 t の硬さ測定値と T_{min} の硬さ値との差は、他の材質、硬さの試料も -1.0 以内に入る。

6) JISの硬さ試験機規格³⁾と基準片規格¹⁰⁾の硬さ指示値の各平均値を総合した誤差は、後者の解説に平均値の差の信頼限界は、9点1反復、信頼率95%で $HRB \geq 60 (\pm 1.3)$, $< 60 (\pm 1.7)$, $HR 30 T \geq 36 (\pm 1.9)$ とある。 ΔH_u が ± 1.5 以内ならば日常の試験には差し支えない。高い精度の試験を行う時は硬さ基準片、標準試料などで校正する

4.2 最小限界厚さの各国規格、研究結果との比較

4.2.1 各国の工業規格

JIS³⁾⁹⁾, ASTM E 18-84, DIN 50103-1972, ISO 6508-1986, 1024-1989(E)の T_{min} と本実験の結果との関係を図8に示す。ASTM E 18は1940年代始めから、Kenyonの研究結果¹⁰⁾を採用している。試料の材質は低炭素のキルド鋼である。バルジの正確な判定が困難であるとして、バルジの認められる最も厚い試料の硬さ値から -2 の線を図に示し、 T_{min} とHR値の関係がASTMの表、図と一致する。この研究はLysaghtが詳述している¹²⁾。手元のSS 400を焼きなまし処理して追試した結果、 $t=0.85$ mm HRB 52.9 ($n=6$, $\sigma=2.6$), $t=0.38$ mm HR 15 T 78.5 ($n=6$, $\sigma=1.6$)と σ は大きい、ASTMの値の0.5以内である。しかし、 $t=1.8$ mm HRB 56.7で明らかにBUMが認められ（図9(a)）、Kenyonの図でバルジ初めて現れたと言う。 $t=1.10$ mmのHRBのBUM（図9(b)）は非常に明りょうである。ASTM E 18の T_{min} に合わせ $t=0.85$ mm（図9(c)）では光点内の干渉じまを撮影でき

Fig. 9 BUM of HRB (SS 400)

なかったが、 A_e は図9(b)で0.56, 図9(c)は0.63である。

4.2.2 ASTM委員会の研究結果との比較

T_{min} に関する資料はHeyerとLysaght: ASTMの委員会のレポート「ロックウェル試験における試料厚さの影響に関する研究の概説」¹³⁾に1953年以前の米国の研究結果が概説され、Kenyonの研究、各種委員会の報告が紹介されている。銅合金の T_{min} を求める2委員会は、いずれも黄銅、青銅、洋白を対象にしたが、板厚対硬さ値の分散が大きく、相関は得られなかった。

5. 結 言

ロックウェル・クォータロード・スーパフィシャル硬さ試験機の指示装置の計測スピンドルを上下2枚の平行板ばねで支え、摩擦を除くよう改造した。基準荷重の精度を長期にわたり安定させることができたので、既に硬さの相似性が確認されているHR 30 T・HR 30 TQにHR 15 T・HR 15 TQを加えた。伸銅所の日常製品の硬さ試験ができるよう、特別な処理をせず裁断した試料の妥当な硬さ値の得られる最小限界厚さ $T_{\min}$ を求めた。 $T_{\min}$ を決定するために3項目の条件を設けた。

- (1) 1) 試料表面のくぼみによる裏面のBUM（ふくらみ、または光点）はかすかであること。
- 2) $|H_s - H_d| \leq 0.1$ (SSA, DSAによる硬さ値の差)。
- 3) A_e (試験荷重下のSSAの局部弾性変形量) が適性値であること。 t の大きさにより0.2~1.0
- (2) 上記の条件を適用して $T_{\min}$ を求め、最小二乗法により各スケールごとに $T_{\min}(T_m)$ と硬さ値の関係式を作成した。通常 t の大きい、硬さの低い材料は、表裏面と芯と硬さの差が大きいから、HRの $T_{\min}$ は同じ硬さ値のHRQの $T_{\min}$ の2倍より大きくなる。
- (3) 試料の材質は5種類である。硬さの低いところは $T_{\min}$ と硬さ値の関係は、ほぼ同じであるが、硬さ値が高くなると同じ $T_{\min}$ の(Bs, PB)グループの硬さ値は(NS)グループより高くその差は大きいから分割した。ひずみ硬化指数の差が原因と考えられる。硬さの測定値と、式による計算値との差は両グループ共に $\leq \pm 1.0$ (C 5191 P, $\pm \leq 1.4$ を除く) である。
- (4) $t/T_{\min}$ が0.8以上ならば H_s の低下は1.0より小さいから、HRQの採用によりHRとあわせて妥当な又は小差

の硬さ値が得られる選択肢が増加した。

- (5) 本研究の結果とISO、各国の規格、研究結果の値と比較すると大きな差がある。ASTM E 18はKenyonの研究結果を採用している。SS 400を焼きなまし処理して、追試をした結果、BUMの判定には大きな差があるが、ASTM E 18のHRB, HR 15 Tとの硬さ値の差は、硬さの低いところでは0.5以内であった。

本研究に試料を提供して下さった(株)清峰金属工業の仲田進一氏、(株)日本鋳業の各位に厚く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 真下美佐男：ロックウェル・クォータロード硬さ試験について（第1報），精密工学会誌，**51**, 2 (1985) 378.
- 2) 真下美佐男：ロックウェル・クォータロード硬さ試験について（第2報），精密工学会誌，**52**, 1 (1986) 156.
- 3) JIS B 7726-1980：ロックウェル硬さ試験機。
- 4) 山城貞男，植村幸生：ロックウェル・スーパフィシャル硬さ値に及ぼす各種誤差の影響（第1報），日本機械学会論文集，**35**, 280 (1969) 2316.
- 5) D. W. Richerson：Modern Ceramic Engineering, 72, Marcel Dekker Inc., New York and Basel.
- 6) 吉沢武男，中村嘉良：小荷重によるビッカース硬さの測定について，日本機械学会論文集，**19**, 79 (1953).
- 7) 日本機械学会編：金属材料の弾性係数，142.
- 8) 中村雅男，戸沢康寿：庄子の平面ひずみ押込みにおける材料の流れ，塑性と加工，**17**, 180 (1976. 1).
- 9) JIS Z 2245-1981：ロックウェル硬さ試験方法。
- 10) JIS B 7730-1980：ロックウェル硬さ基準片。
- 11) R. L. Kenyon：Effect of Thickness on the Accuracy of Rockwell Hardness Tests on Thin Sheets, Proc. Am. Soc. Testing Mats., **34**, Part II, (1934) 255.
- 12) V. E. Lysaght：Indentation Hardness Testing, Reinhold Publishing Corp., New York, N. Y., (1951) 161.
- 13) R. H. Heyer and V. E. Lysaght：Survey of Investigations of Effect of Specimen Thickness on Rockwell Tests, ASTM Bull., Oct. (1953) 164.