70~84℃の範囲にある。

(3) A. W. に対する N. T. + SR の影響に関し, C_v では 40 ft-lb, K_{Ic} , K_{Id} では 200 kg/mm^{3/2} を示す温度を遷移温度として低温への移動量を調べた結果, 継手各位置により若干の差はあるものの, ある位置での C_v , K_{Ic} , K_{Id} の移動量はかなりよく一致する。

(4) A. W. 低靱性材料と N. T. + SR 高靱性材料に大別して, それぞれの C_v と K_{Ic} , K_{Id} とのおおよその相関を表わす式を誘導した。

なおこの研究は製作工場規模での供試材をもって行ったので試験片数などの諸条件に不備の点少しとせず, しかし大筋としては一応の成果が得られたと思われるのであえて大方の批判をあおぐこととした。終りにこの研究は昭和49, 50年度金沢大学卒業研究として, 村上恵一君ほか3名の協力を得たことを記して心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林: 破壊靱性とその評価法 (1), 材料, 27-297 (1978), 501s.
- 2) 小河, 森川: シャルビ試験片による高張力鋼 (HW-70) の破壊靱性について, 日本機械学会北陸信越支部講演論文集, No. 747-2 (1974)
- 3) 日本溶接協会 7HST 小委員会: 原子炉圧力容器用極厚鋼材の安全性に関する試験研究 (1978)
- 4) P. B. Closley, E. J. Ripling; Plane strain crack arrest characterization of steels, J. of Pressure Vessel Technology (1975)
- 5) ASTM; Standard method of test for plane strain fracture toughness of metallic materials, ASTM E-399-74 (1974)
- 6) R. J. Witt; Heavy Section Technology Program meeting, Paper No. 12 (1971)
- 7) S. Rolfe; ASTM STP 466, (1970), 281s~302s
- 8) R. Sailors; Heavy Section Technology Program 5th (1971), 3

オーステナイト系ステンレス鋼の 摩擦圧接に関する研究(1)*

—摩擦圧接部のシャルビー吸収エネルギーについて—

沖田 耕三**, 岸本 和一郎***

Studies on Friction Welding of SUS 304 Austenitic Stainless (Report 1)*

—Charpy Absorbed Energy of Friction Welded Joint—

by Kozo Okita** and Waichiro Kishimoto***

The charpy V-notch impact characteristics of friction welded joints have been studied with attention to the influences of testing temperature, solution treatment and base metal characteristics. The results are summarized as follows.

- (1) The ductile-brittle transition of friction welded joints from -196°C to 20°C was not observed.
- (2) The main cause of the decrease in the charpy absorbed energy of the friction welded joint was considered to be the reorientation of the non-metallic inclusions contained in the base metal.
- (3) Solution treatment at 1050°C of charpy absorbed energy of friction welded joint gave at most 55% value of that of the base metal, remaining the fiber structure present on the fracture surface.
- (4) Charpy V-notch impact characteristics of base metal was considered to be transmitted to those of the friction welded joint.

*原稿受付 昭和54年3月26日 (昭和52年度秋季全国大会にて発表)

**正員 兵庫県立工業試験場 Member, Industrial Research Institute of Hyogo Prefecture

*** 兵庫県立工業試験場 Industrial Research Institute of Hyogo Prefecture

1. 緒 言

近年, オーステナイト系ステンレス鋼は, 高温用材料, 低温用材料, 耐食用材料として, その利用が増している。そして, この鋼種は高価であり一般に難加工材であることから, 材料費の節約と合理的な接合法の追求を目標として, 摩擦圧接の利用が試みられ, 実用されている。

しかし, 同鋼種の摩擦圧接継手の機械的性質に関する報告は殆んど行われていない¹⁾。

本研究では, まずフェライト系鋼においてしばしば問題とされる継手の衝撃特性の低下が²⁾ オーステナイト系ステンレス鋼にも現われるかという観点に立って, シャルピー吸収エネルギーの温度依存性を検討し, 合わせて, 高温に長時間加熱された場合の耐衝撃の変化と母材自身の性質の継手への影響についても実験を加えた。

2. 供試材, 圧接条件および衝撃試験片

供試材は, Table. 1 に示す化学成分をもつ直径 19 mm の市販オーステナイト系ステンレス鋼棒 (SUS 304 熱間

Table 1 Chemical composition of base metal

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.08	0.94	1.72	0.042	0.018	8.50	19.68	Bal

Table 2 Welding condition

Friction speed	Friction time	Forge time	Friction pressure	Forge pressure
3000 r. p. m	9 sec	10 sec	7 kg/mm ²	15 kg/mm ²

Total upset : 5mm

圧延・酸洗)である。これを, 50 mm の長さに切断して端面を旋削加工したのち, ブレーキ式摩擦圧接機により Table. 2 に示す条件で摩擦圧接を行って継手を作製し, その中心部から JIS 4 号衝撃試験片を採取した。

また, 切欠き位置の正確さを期すため, 10% シュウ酸液で電解腐食し圧接面の位置を確認するとともに, 切欠き加工後も顕微鏡下でその位置を再確認し, 切欠き位置がずれている試験片は排除した。

衝撃試験に際しては, 同一試験条件に対して 3~5 本の試験片を割当ててある。衝撃試験はすべてシャルピー衝撃試験機による。

3. 実験結果および考察

3.1 摩擦圧接継手の引張強さと伸び

本実験で使用した圧接条件が適正であるか否かについて検討するため, 継手を直径 10 mm, 平行部長さ 60mm

Table 3 Tensile properties of base metal and friction welded joint

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation % (GL : 50mm)
Base metal (As received)	65.1	65.5
Base metal (1050°-30min W. Q)	60.2	66.1
friction welded joint	62.0	47.5

の引張試験片に加工し試験を行った。常温における継手の引張強さと伸びを母材 (受入のままおよび溶体化処理材) のそれらと対比して Table. 3 に示す。継手の引張強さは, 受入れのままの母材のそれと比べて約 3 kg/mm² 低い値となっているが, 溶体化処理した母材のそれより約 2 kg/mm² 高い値である。また, 継手の伸びも母材の約 72% の値である。これから, Table. 2 に示した圧接条件は適正であると判断した。

3.2 シャルピー吸収エネルギーの温度依存性

Fig. 1 は, 圧接面に切欠きを入れた試験片を用いた場合の試験温度とシャルピー吸収エネルギーの関係を母材のそれと対比して示したものである。圧接部 (圧接のまま) は常温 (20℃) から -196℃ の間で急激な吸収エネルギーの低下は示さないが, その絶対値は低く, たとえば, 0℃において圧接部の吸収エネルギーは 6.4 kg-m で母材の 19.7 kg-m の約 33% であり, また, -196℃でも圧接部は 4.3 kg-m で母材の 15.5 kg-m の約 28% となっている。

Fig. 1 Relation between test temperature and charpy absorbed energy of friction welded joint and base metal.

また, 圧接後溶体化処理 (1050℃×30 min 水冷) を施しても圧接部の吸収エネルギーはそれほど向上しない。

Photo. 1 は 20℃ および -196℃ における母材および圧接部の衝撃破面を, また, Photo. 2 は走査電顕によるそ

これらの観察結果の一例を示したものである。

Photo. 1 にみられるごとく、圧接部は摩擦圧接特有の渦巻状の破面を呈して材料の流れの変化を示しているが、いずれの温度においても延性破壊に近い様相を示している。さらに、Photo. 2 のミクロ的な破面観察から、圧接部は母材と比較してデインプルの深さは浅いものの、いずれも延性破面であることが確認された。このことから、圧接部は20℃から-196℃の間に遷移温度をもたないことが結論される。

Photo. 1 Appearances of fractured surface after Charpy impact test.

Photo. 2 Some micro fractographs of impact fractured surface at friction welded interface.

圧接面は延性破面を呈するにもかかわらず母材よりかなり低い吸収エネルギーを示すことについて一、二検討を加える。Fig. 2 は、圧接面を原点として軸方向に切欠位置を移動させた場合の吸収エネルギーの変化を示したものである。同図から、吸収エネルギーが低下しているのは圧接面を挟み両側 0.5 mm の範囲で、圧接面を 1 mm も離れると吸収エネルギーは14 kg-m とかなり母材に近い値を示すことがわかる。すなわち、圧接面のごく近傍のみ吸収エネルギーが低下することになる。

すでに、炭素鋼摩擦圧接部の吸収エネルギーが低下する原因は繊維組織の乱れ(方向の変化)にあることが報告されている³⁾。炭素鋼においては、圧延によって母材はフェライトとパーライトの層状組織となることおよび

Fig. 2 Variation of Charpy absorbed energy of friction welded joints. (20°C)

非金属介在物が圧延方向に配列されることの双方によってその機械的性質に方向性を生ずることになる。この知見を基に、本研究の対象であるオーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接部の組織を調べる。

Photo. 3 は、圧接面近傍の非金属介在物の状態を示す一例で、圧接面から 0.5 mm 程度離れた位置に、材料の流れに沿ってひも状に延びた MnS が観察される。また、圧接面近傍には、微細な析出物が認められる。さらに、Photo. 4 に示すように衝撃破壊の経路は圧接面よりも、むしろ材料の流れの方向に配再列された非金属介在物に沿う傾向が認められる。これらのことから、この介在物の流れが圧接部のシャルピー吸収エネルギーを低下させる原因であると推論される。Fig. 3 はフェライトインジケータによって圧接面近傍の δ フェライトが0.2~0.3%、圧接面から 0.5 mm 離れた位置では0.1~0.15%の値が示されている。また、圧接面から 1 mm 離れると δ フェライトは検出されない。しかし、顕微鏡による観察ではいずれの位置においても、 δ フェライトは確認できず、また、-196℃の衝撃破面(Photo. 2)においてもへき開破面が認められないことから、 δ フェライトの影響は無視できるものといえる。

Photo. 3 Flow of non-metallic inclusion at friction welded joint.

Photo. 4 Microstructures at near the fractured part of Charpy impact specimen.

Fig. 3 Changes in the amount of δ -ferrite at friction welded joint.

3.3 高温長時間加熱によるシャルピー吸収エネルギーの変化

通常オーステナイト系ステンレス鋼は550℃以下の温度で実用されるが、これ以上の温度域に長時間さらされた場合に母材および圧接部がどの程度脆化するかを検討した。Fig. 4は、550～1050℃の各温度に100時間加熱保持後水冷した母材および圧接面の常温における吸収エネルギーの変化を示したものである。

550～850℃の温度範囲では、母材の吸収エネルギーは加熱温度の上昇に伴って21 kg-m から12 kg-m と急激に低下するが、圧接面のそれは4 kg-m (圧接のままの値の約65%に相当する) と殆んど変化しない。このことは、圧接のままの状態において、すでに、圧接による熱履歴によって脆化のもとになる炭化物の析出が恐らく進んでいることを示すものと推察される。950℃に加熱さ

Fig. 4 Changes in Charpy absorbed energy of friction welded joint and base metal after being heated for 100 hours at each temperature.

Photo. 5 Fractured surface of Charpy impact specimen which was water-quenched after being heated at 1050℃ for 100 hours.

れた圧接部の吸収エネルギーは6 kg-m と圧接のままのそれと殆んど変化なく、また1050℃に加熱された圧接部のそれは10.2 kg-m と圧接のままのものよりも高い値を示している。これは、溶体化処理温度に再加熱されることにより炭化物が再固溶し、かつ、拡散による組成の均一化が行われたためと考えられる。

しかし、この10.2 kg-m の値も、同じ条件における母材の19 kg-m に比べれば約55%の値であり、かつ、圧接部の衝撃破面には、Photo. 5に示すようにうず巻状の材料の流れが認められることから、圧接によって生じた材料の流れの変化により再配列された非金属介在物の方向性は依然として解消されないものと判断される。

3.4 圧接部のシャルピー吸収エネルギーに対する母材吸収エネルギーの影響

摩擦圧接は母材同士を溶融することなしに接合する方法⁴⁾であるため、何らかの形で母材自身の性質が圧接部に影響することが考えられる。

そこで、受入れ材を各種の条件で熱処理を施し、

Table 4 に示す吸収エネルギーをもつ母材を作製し、Fig. 5 中に示した各条件下で圧接した。Fig. 5 は各圧接条件下で得られた圧接部の吸収エネルギーと母材のそれらとの関係を示したものである。同図において、母材の吸収エネルギーが増すと圧接部のそれらも増していることから、母材の性質が圧接部の性質に影響を与えていることがわかる。

Table 4 Solution treatment condition of base metal and their charpy absorbed energy.

	Solution treatment condition	Charpy absorbed energy (kg-m)
1	1000°C-30min W.Q	16.2
2	1100°C-10min W.Q	16.8
3	1050°C-20min W.Q	17.9
4	1100°C-30min W.Q	19.0
5	1050°C-60min W.Q	20.7
6	1150°C-30min W.Q	22.1

Fig. 5 Relation between charpy absorbed energy of base metal and that of friction welded joint.

また、耐衝撃性は圧接条件によってあまり改善されなとも言われているが、Fig. 5 では、圧接条件 A・B・C の間かなりの差異が認められる。

これらの原因はつぎのように考察される。

まず第 1 点は、圧接条件 A・B・C の順で圧接面の吸収エネルギーが低下しているのは、この順でアプセット圧

力が高く設定してあり、その結果、圧接部における繊維組織のゆがみがこの順序で大になるためである。

第 2 点は、同一の寄りしろを得るために条件 A・B・C の順で摩擦時間が短かく設定されており、したがって、この順序で変形域の厚さが薄くなり圧接面に圧縮変形が集中して繊維組織のゆがみを助長するためであると考えられる。

4. 結 論

オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 304) 圧接部を対象として、圧接部のシャルピー吸収エネルギーの温度依存性、高温長時間加熱による圧接部吸収エネルギーの変化、圧接部吸収エネルギーと母材吸収エネルギーの関係について実験と検討を行い、つぎの結論を得た。

(1) SUS 304 ステンレス鋼圧接部は常温から -196℃ の温度範囲で延性-脆性遷移温度をもたない。

(2) 圧接部 (面) のシャルピー吸収エネルギーは母材のその約 30% である。この低下は、圧接面近傍において、材料の流れにそって、再配列された非金属介在物の存在に起因するものと推察される。

(3) 溶体化処理温度の 1050℃ に 100 時間加熱保持した圧接部のシャルピー吸収エネルギーは、圧接のままのその約 1.8 倍まで回復するが、母材自身の値には及ばない。また、この衝撃破面から、繊維組織の消滅を図ることが困難であることを示している。

(4) 圧接条件のいかにかわらず、母材の吸収エネルギーが低い場合は、得られた圧接部の吸収エネルギーも低い。このことは、母材の性質が圧接部に遺伝することを示している。

最後に、本研究を行うにあたり、終始熱心に討論に参加していただいた金属材料技術研究所、福島貞夫氏に対し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 相原, 小原, 服部: SUS27 摩擦圧接材の機械的強度と応力腐食割れについて, 摩擦圧接研究会資料 No. 65
- 2) 塩谷, 山田, 葛谷: 摩擦溶接された炭素鋼の衝撃強さの低下原因および 2, 3 の検討, 本誌 35-1 (1966) 65-71
- 3) 2) に同じ
- 4) たとえば蓮井, 福島: 摩擦圧接における 摩擦面の温度 と 圧接部の構造について, 材料科学 6-2 (1969) 38-50