

炭素鋼拡散接合継手の衝撃強さと後熱処理の影響

安藤 正昭・宮野 泰治

“Impact strength and PWHT effect on diffusion bond joint of carbon steel”

Masaaki ANDO and Taiji MIYANO

(1995年11月30日受理)

The purpose of the present investigation is to improve the mechanical properties especially impact strength of carbon steel diffusion bond by PWHT according to transition temperature of parent metal. Strength of bond joint was examined by tensile test, Charpy impact test and impact tension test. Bond strength were accomplished parent metal strength in regard to tensile stress, whereas bond strength were definitely lower than parent metal from the standpoint of energy dissipated for fracture. Charpy impact strength of joint which bonding surface finished with emery paper (# 1200) increased about 20% at the most of parent metal, though structure near the bond line was improved by PWHT. A₁~A₃ cyclic heating and diamond paste finishing for bonding surface provided about 90% of Charpy impact strength of parent metal. Poor charpy energy of diffusion bonds are attributed to the defects at bond line.

1. はじめに

拡散接合は、固相のまま材料の接合面間に生ずる原子の拡散により接合する方法であり、同種金属同士の接合はもとより異種金属および金属とセラミックスなどの異種材料の接合にも広範な適用が試みられている。しかし、材料原子の拡散現象による接合であることから、接合は真空雰囲気あるいは不活性ガス雰囲気のチェンバー内で行なわれるのが一般的であり、接合材料の形状やサイズも制約されることになる。

前報では、チェンバーを使用しない大気中で炭素鋼の拡散接合を試み、その機械的性質が調べられた。それによると、低炭素鋼および中炭素鋼は大気中においても拡散接合が可能であることが示され、拡散接合継手の引張強度は母材と同等の強度が得られたにもかかわらず、衝撃強さは極めて低いことが指摘された。⁽¹⁾ 拡散接合継手は軽合金の宇宙航空関係部品等に広く用いられており実用性は高く認められているものの、構造用継手としても適用範囲を広げるためには、引張強度のみならず、低い衝撃強さの問題を解決することが必要である。拡散接合継手の強度は、引張試験や曲げ試験によって評価されている

表1 供試材料の化学組成 (wt.%)

Alloy	C	Si	Mn	P	S	Fe
SGD 3M	.17	.24	.66	.022	.015	Bal.

報告が多く、衝撃試験による報告例は少ない。^{(2)~(7)} 本報告は、衝撃強さの高い接合継手を得ることを目的として、鋼の変態点温度を基にして接合温度の熱サイクルを変化させ、さらに接合継手の後熱処理によって接合界面の改良を試みた。得られた継手は引張試験の他に、シャルピー衝撃試験および衝撃引張試験によって継手強度を評価検討した。

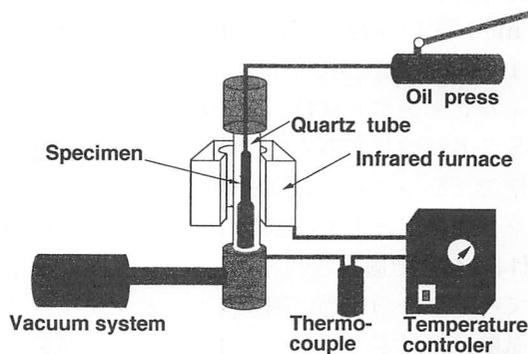


図1 拡散接合装置

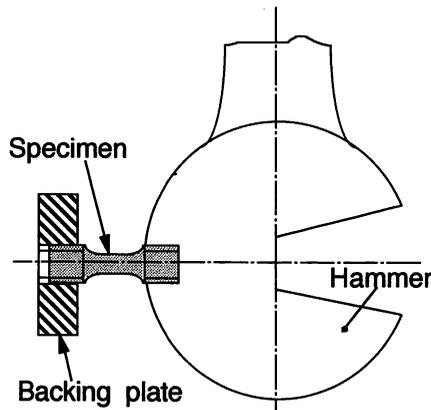


図2 衝撃引張試験方法

2. 実験方法

本研究で用いられた母材は、直径20 mmのみがき棒鋼 SGM3D であり、その化学組成を表1に示す。

長さ40 mmに切断された母材は、接合端面を旋盤加工後にエメリー研磨紙(#1200)で仕上げたもの、およびエメリー研磨後にダイヤモンドペースト(1 μm)でバフ研磨したものを接合試片とした。接合の前処理はアセトン中において超音波による脱脂洗浄を行なった。

図1に外熱式拡散接合装置の概略を示す。接合試片は装置に取付けられ、加熱加圧される。加熱は透明石英管を通して赤外線ゴールドイメージ炉によっておこない、接合部の温度は試片の接合部近傍にパーカッション溶接されたCA熱電対によって測定され、設定温度の±0.5 K以内で制御される。加圧は油圧プレスによって行なわれ、透明石英管内の真空度は10⁻² Pa以内である。

接合界面の金属組織観察に用いられた腐食液は3%ナイトール液である。

接合継手の引張試験にはインストロン型引張試験機が用いられ、接合継手から旋盤加工した平行部直径8 mm、平行部長さ32 mmの試験片で、ひずみ速度は1~200 mm/min.で行なった。

シャルピー衝撃試験は、接合界面にノッチを入れたJIS 3号試験片である。衝撃引張試験は図2に示す方法で、シャルピー試験機のハンマー部分にバックリングプレートとともに試験片(平行部直径6 mm)がM14のねじで固定される。バックリングプレートによってハンマーの運動が制止させられ、全エネルギーが試験片に引張力となって加わる。引張試験において試験片の破断に要したエネルギーは、引張試験

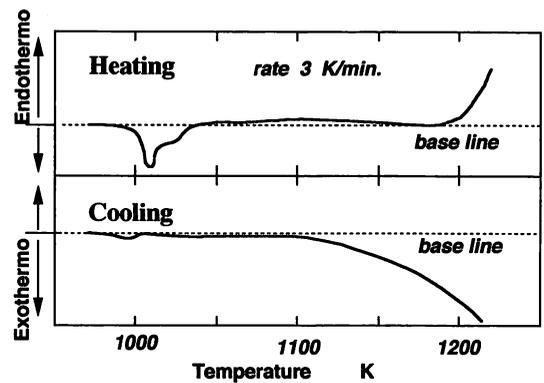


図3 示差熱分析結果

チャート紙からPIAS525の画像解析処理によって荷重—伸び線図の面積比から求めた。また、破断面についてSEM観察が行なわれた。

3. 実験結果と考察

3.1 示差熱分析

前報の低炭素鋼および中炭素鋼の拡散接合において、鋼の相変態温度を有効に使うことによって、母材破断するほどの強度を有する継手を得ることが出来た。すなわち、鋼のA₁変態点とA₃変態点温度間を繰り返し加熱操作することによって継手の強度は高くなった。これはα相の拡散係数とγ相の拡散係数が2オーダーほどの差があることに加え、結晶構造の違いによる体積変化のために接合界面の揺動が起り、接合が促進されるものと考えられる。

本実験においても変態点温度を利用した接合とPWHTを行ない継手強度の向上を試みた。そこで、供試材料の変態点を求めるために、示差熱分析を行なった。アルミナを標準試料として、昇温速度、降温速度をそれぞれ3 K/min.として得られた示差熱分析曲線を図3に示す。降温の際には明確ではないが、昇温過程では2つの大きな吸熱反応が認められる。この熱分析曲線とFe-Fe₃C系平衡状態図から、A₁変態点温度を993 K、A₃変態点温度を1123 Kと決定し、以後の実験を行なった。

3.2 接合条件と後熱処理

拡散接合は接合温度、接合時間および接合圧力によって支配されるものである。高温で長時間にわたり高圧力で接合されれば確実に接合は促進されるが、拡散接合の変形量が少ないという利点は失われ、また結晶粒の成長は継手の機械的性質を損なうことになる。接合時間を30分とし、接合温度をA₁変態点

炭素鋼拡散接合継手の衝撃強さと後熱処理の影響

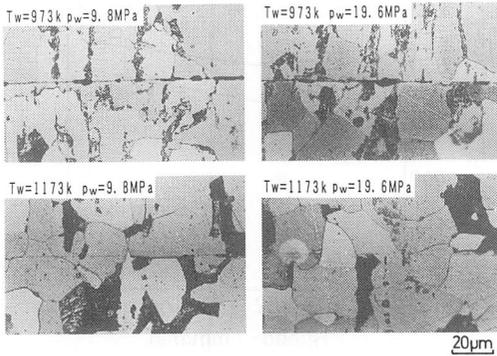


写真1 接合条件による接合界面組織

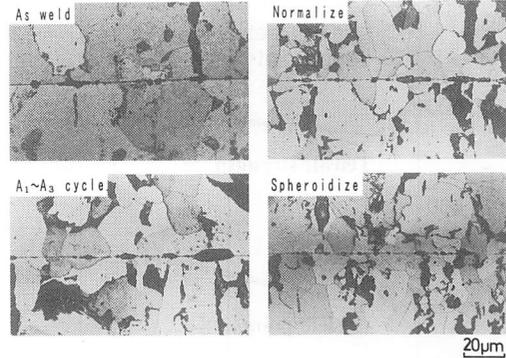


写真2 後熱処理による接合界面組織

温度以下の973 K, および A_3 変態点温度以上の1173 K, 接合圧力を9.8 MPa, 19.6 MPa としたときの接合界面の光学顕微鏡組織を写真1に示す。高温、高圧力での接合においては界面の接合ラインが消滅し、接合状態が良好であることは歴然としている。しかし、1173 K, 19.6 MPa の条件は接合中の変形量が大きすぎて、安全上から本接合装置で実験は不可能である。そこで本実験の接合条件は973 K, 9.8 MPa として、接合後の熱処理(PWHT)によって接合界面の改善を行ない、機械的性質の向上を試みた。

写真2に、後熱処理による接合界面の組織を示す。PWHTは、それぞれ1173 K から焼きならし (Normalize), 973~1173 K を3回繰り返し加熱後に冷却 (A_1 - A_3 cycle), 973~1023 K を5回繰り返し加熱後に冷却 (Spheroidize) したものである。なお、これらの処理の冷却は、赤外線加熱炉の電源を切り、真空状態を維持したまま、透明石英管を露出して空冷した。いずれのPWHTも、接合界面を越えた結晶粒の成長が見られ、界面の接合ラインも部分的に消滅するので、継手の機械的性質は改善されることが期待できる。特に、Spheroidize したものは界面のパーライトが球状化し、界面近傍の結晶粒も細粒化するので、接合継手の靱性が向上することが推察される。また、界面の接合ライン上に散在するパーライト形状のみに注目すると、パーライト粒は幾分小

いが焼きならし (Normalize) したものと酷似している。 A_3 変態点温度以上からの空冷する焼きならしは、 A_1 変態点温度の繰り返し加熱によるパーライトの球状化処理には及ばないが、接合界面のパーライトを球状化している。焼きならし温度からの冷却速度は計測されていないが、真空状態の石英管内で γ 相から α 相の冷却が比較的緩やかに行なわれるためにパーライトが球状化しやすいものと考えられる。球状化熱処理とほぼ同様な接合界面組織を得ることができれば、PWHTとしては時間を要する繰り返し加熱よりも焼きならしの方が効率的である。そこで、前報で好結果が得られた接合条件、すなわち A_1 変態点温度を繰り返し加熱して接合し、PWHTとして焼きならしを行なったときの接合界面の組織を写真3に示す。

3.3 継手の機械的強度

引張試験とシャルピー衝撃試験を行ない、継手の機械的強度を調べた。接合のままの試料とPWHT

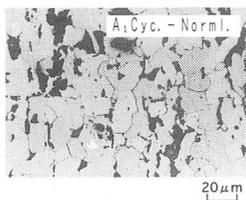


写真3 後熱処理による接合界面組織

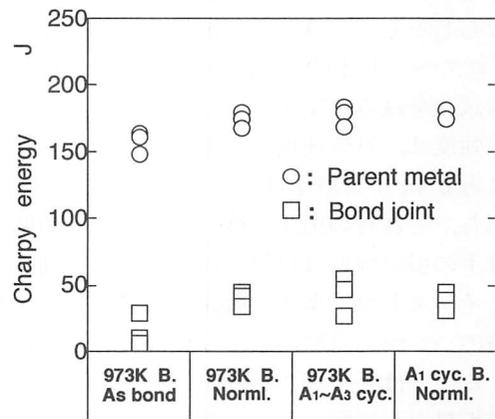


図4 シャルピー衝撃試験結果

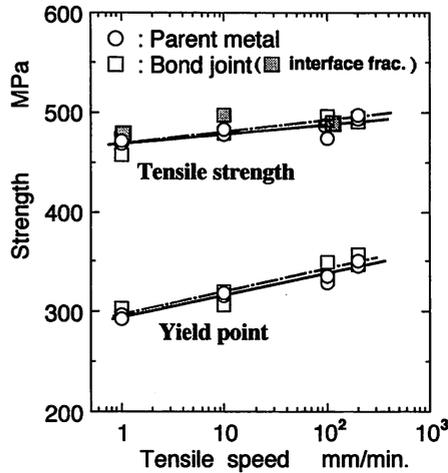


図5 引張試験結果

した試料について、クロスヘッド速度を 1 mm/min. とした引張試験において、数例を除いては母材破断となり、引張強さは速い変形速度に対して母材（接合および PWHT の熱履歴を与えた）とほとんど変わらない。このことは、いずれの接合継手も引張強度は母材並の強度に達していることを示している。しかし、シャルピー衝撃試験結果を図 4 に示すが、母材に対して極めて低いことがわかる。PWHT 試料は、接合のままの試料に対して衝撃吸収エネルギーは 2 倍程度までに改善されたことになるが、母材の衝撃吸収エネルギーの約 20% 程度まで達成したに過ぎない。拡散接合継手の衝撃強さが極めて低いことは以前から指摘されている。^{(2)~(4)} このことが、拡散接合継手の構造部材への適応を阻害しているものと考えられる。シャルピー衝撃試験は、曲げの応力形態をとることと、試験速度がきわめて速いことが引張試験と異なる点である。そこで、速い変形速度のもとで継手の引張強度がどのような値をとるか調べるために、 A_1 変態点を繰り返し加熱後焼きならしをした (A_1 cyc.-Normal.) 試料について、クロスヘッド速度を 10, 100, 200 mm/min. とし引張試験を試みた結果を図 5 に示す。降伏点および引張強度は、試験速度とともにいくぶん上昇する傾向にあるが、接合継手は母材と同等な値を示した。すなわち、これらの引張速度（変形速度）範囲内では、継手の引張強度は母材と同等なもの判断できるが、インストロン型の引張試験機では、シャルピー試験のハンマー打撃時のような高速な試験速度を設定することは不可能である。そこで、図 2 に示す方法で衝撃引張試験を行なった。この方法では、引張りの応力形態でシャルピー衝撃試験と同じ試験速

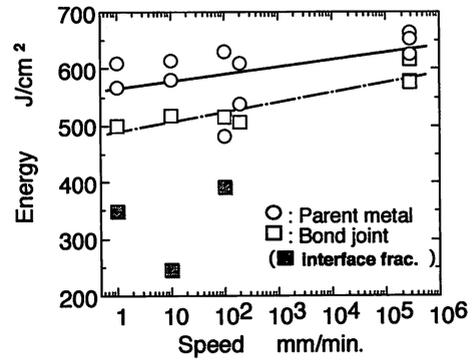


図6 引張による破壊エネルギー

度（変形速度）が得られる。ここで、打撃ハンマーの位置のエネルギーが全て運動エネルギーに変換され、回転部分の摩擦や空気抵抗によるエネルギー損失がないものと仮定し、

$$\text{位置のエネルギー (30 kg}\cdot\text{m)} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

として、ハンマーの打撃速度 v を試算すると、 2.89×10^5 mm/min. となる。この方法では、試料の破断に要したエネルギーは求められるが、降伏点や引張強さは決定できない。衝撃引張試験において、継手試験片はすべて母材で破断した。前述の引張試験片と同じ平行部直径 8 mm では破断しないので、衝撃引張試験片の平行部直径は 6 mm としている。シャルピー衝撃試験では試験片形状の相似則は成り立たないのであるが、この試験は引張の応力形態であり、静的引張試験の試験速度が極端に速くしたものとすると、相似則を適用できるものと考えられる。計装化シャルピー試験機による実験では、きれつ発生までのエネルギーときれつ伝播エネルギーを分別して考えることも出来るが⁽⁶⁾、本実験においては継手の破断に要した全エネルギーで処理する。この衝撃引張試験結果と前述の引張試験結果を比較するために、継手の単位断面積当りの破断に要したエネルギーに換算し、その結果を図 6 に示す。図 5 のように、引張強さを応力で表した場合には、接合継手の強度は母材と同じレベルとなり、母材強度に達したものと判断されるが、図 6 のようにエネルギーで整理してみると、継手の破断に要するエネルギーは明らかに母材よりも低いことが解る。これは継手試験片の破断までの塑性変形量が少ないためにエネルギーは低くなるものと考えられる。特に接合界面近傍の塑性変形量が少ないためである。このことは、グラフ中の界面破断した場合の 3 つの点にも示されている。

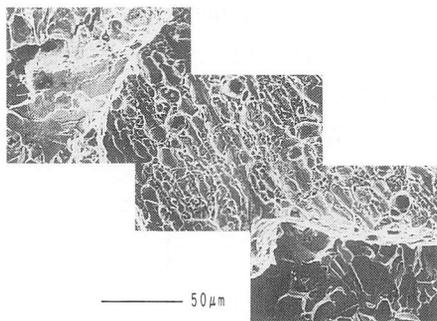


写真4 シャルピー破面 SEM

継手強度をこのように考えると、破壊に至る応力のみでなく、破壊までに要するエネルギーをも考慮することが必要である。従って、速い変形速度に対する接合継手の強度は母材強度と同等であると判断するわけにはいかない。

一方、シャルピー衝撃試験後の接合界面部の破面のSEM観察結果を写真4に示す。3段になっている破断部分は、界面とそれぞれの母材部分を示している。母材部分はへき開破壊を示しており、界面部分では細かいディンプル状を呈している中にエメリー紙による擦痕が認められる。界面のディンプルは引張強度を裏付けているものであり、全体の面積に対する擦痕の占める面積割合から、引張応力に対する継手の強度は母材並になることが推測できる。しかし、この擦痕は曲げ応力に対して切り欠きとして働き、シャルピー試験の衝撃曲げ荷重では、さらに苛酷な切り欠き効果として継手の破壊に作用するものと考えられる。そこで、1ミクロンのダイヤモンド・ペーストで試料の接合面を研磨し、接合条件もA₁変態点とA₃変態点間の繰り返し加熱として接合した継手の衝撃試験も試みた。この継手の衝撃吸収エネルギーは、母材の約90%に達した。接合継手について、これまでの引張試験およびシャルピー衝撃試験の結果を、母材の引張強度および衝撃吸収エネルギーを1として、接合継手別に表すと、図7のようになる。接合面をエメリー紙研磨した接合継手の強度はPWHTによって改善され、シャルピー衝撃エネルギーは母材の20%程度まで達成された。河野等の実験では、衝撃強さは母材の1/7~1/5としており⁽²⁾、あるいは宮坂等は接合後に拡散焼鈍して接合界面の欠陥率を調べて母材の65%⁽⁷⁾、の衝撃強さを得ている。

以上のことから、接合面の表面粗さを小さくして接合の塑性変形量も大きくすることによって、衝撃強さも母材と同じ程度までに改善することが可能で

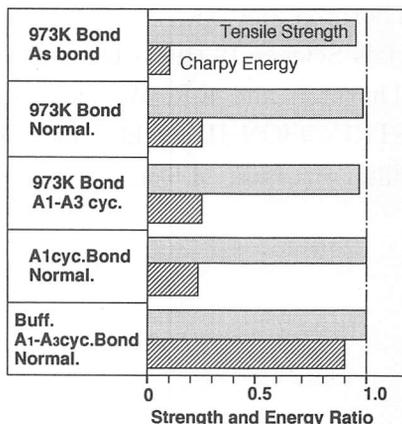


図7 母材に対する強度比

であると推定する。

4. 結 言

炭素鋼の拡散接合継手の強度を改善するために後熱処理を行ない、その継手についての引張試験、シャルピー衝撃試験および衝撃引張試験で継手の強度について検討した結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 後熱処理によって接合界面の組織が改善され、引張強度においては、引張速度に関係なく継手は母材強度に達した。
- (2) しかし、継手の引張破壊に要するエネルギーは母材のそれよりも低いエネルギーとなる。
- (3) 変態点温度を利用した接合と後熱処理および接合面の仕上げによって、継手のシャルピー衝撃エネルギーは母材の約20%~90%まで改善できた。

本報告は、平成3~5年度における卒業研究において行われたものであり、安部厚志(現 ニューロン工業)、桑高伸彦(現 川崎重工)、利部直樹(現 アキタ電子)、高松克雄(現 石川島播磨重工)の諸氏に感謝いたします。また、技官の進藤錦悦氏には実験をご支援頂きましたことを記して感謝いたします。

参考文献

- (1) 安藤正昭, 宮野泰治, 秋田高専研究紀要 No. 25 1990 7-13
- (2) 河野顕臣, 中江秀雄, 才川至孝, 佐々木敏美, 溶接学会誌 51 (1982) No. 4 pp. 371-377

- (3) C.E. Thornton and E.R. Wallach, Journal of Materials Science 18 (1983) 1433-1442
- (4) C.E. Thornton and E.R. Wallach, METAL CONSTRUCTION JULY 1985 450R-455R
- (5) 河野顯臣, 中江秀雄, 才川至孝, 小出一征, 溶接学会論文集 3-2 (1985) 315-320
- (6) 中野光一, 中村憲和, 溶接学会講演概要 55 (1994) 10 232-233
- (7) 宮坂勝利, 清水寛一郎, 溶接学会講演概要 55 (1994) 10 238-237