

高合金耐熱鋼の溶接補修技術

Welding repair technology for high alloy heat resistant steels

中野 正大* (技術本部 企画開発部), 山口 ちひろ (技術本部 企画開発部)
安西 敏雄 (顧問)

Masahiro NAKANO (Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division)

Chihiro YAMAGUCHI (Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division)

Toshio ANZAI (Consultant)

石油精製および石油化学プラントにおいて、高温で長時間使用した高合金耐熱鋼では、様々な経年変化や損傷が発生するため、設備の性能を維持する目的でそれらの更新ならびに部分的な修復を行う必要がある。更新を行う場合は更新範囲が限定的になるため、経年変化した既設部材との溶接が発生する。また、部分的な修復を行う場合も同様に既設部材の溶接が発生する。高温で長時間使用した既設部材は溶接性が低下している場合があるため、通常の溶接条件では溶接欠陥や溶接割れが発生するおそれがある。そのため、経年変化や損傷の程度を把握して、その材料の性能に適した溶接条件で溶接する必要がある。ここでは、エチレン製造装置の分解炉の輻射部および輻射部と急冷熱交換器までの連絡管において、溶接にともなう問題とその対策の事例を溶接補修技術として紹介する。

Because various aging deterioration and damage occurs in high-alloy heat resistant steel used at high temperature for a long time, damaged places need to be renovated or partially repaired in order to maintain equipment performance at petroleum refining plants and petrochemical plants. If such steel is to be renovated, because the scope of renovation is limited, welding with the existing aged material will take place. Welding with the existing material is also required in cases of partial repair work. Because the welding properties of the existing material used at high temperature for a long time may have degraded, normal welding conditions may cause a welding defect or crack. Thus, the state of aging or level of damage must be evaluated and welding conducted under conditions appropriate for the properties of each material. This section introduces welding-related problems and their corresponding countermeasures as welding repair techniques in terms of the radiant section of the cracking furnace in an ethylene manufacturing machine and the connection pipe between the radiant section and quencher.

1. はじめに

石油精製および石油化学プラントにおいて、高温で長時間使用した高合金耐熱鋼では、様々な経年変化や損傷が発生するため、設備の性能を維持する目的でそれらの更新ならびに部分的な修復を行う必要がある。更新を行う場合は更新範囲が限定的になるため、経年変化した既設部材との溶接が発生する。また、部分的な修復を行う場合も同様に既設部材の溶接が発生する。高温で長時間使用した既設部材は溶接性が低下している場合があるため、通常の溶接条件では溶接欠陥や溶接割れが発生するおそれがある。

このような問題が多く発生する設備として、エチレン製造装置の分解炉の輻射管および輻射管から急冷熱交換器までの連絡管（以下は連絡管と示す）がある。これらを高温で長時間使用することで、酸化、窒化、炭化水素が管内面に固着して固形炭素が拡散して生じる浸炭、二次炭化物の析出と塊状化、ならびに延性の低下といった経年変化が発生する¹⁾。

輻射管および連絡管の材料には、耐浸炭性を有する高合金耐熱鋼で、前者に0.5C-43Ni-32Cr、0.2C-38Ni-25Crや0.4C-35Ni-25Crなどが、後者には0.1C-35Ni-25Crや0.1C-32Ni-20Crなどが使用されている。そして、それらの同じグレードを溶接する場合には共金となる溶加棒が、異なるグレードを溶接する

* 現:九州工業大学 大学院 生命体工学研究科 Kyushu Institute of Technology, Graduate School of Life Science and Systems Engineering

場合には高グレード側の共金となる溶加棒が、一部ではNi-Cr-Co-Mo合金である617の溶加棒が使用されている。

ここでは、分解炉の輻射管および連絡管において、溶接にともなう問題とその対策の事例を溶接補修技術として紹介する。

2. 酸化層と熱影響部の指示模様

高温で長時間使用した輻射管および連絡管では、外面側および内面側に酸化層が発生する。図1に輻射管の外面側の断面マイクロ組織を示す²⁾。この酸化層が残存した状態で溶接を行うと溶接欠陥が発生しやすいため、酸化層を除去する必要がある。その際には被溶接部のみではなく、溶接の熱影響がおよぶ範囲も除去することが望ましい。これは被溶接部の周辺に酸化層が残存していると溶接後の浸透探傷試験で、その部分に指示模様が検出され、本来の目的とする熱影響部に割れが発生しているか否かを判定できなくなるためである。溶接前に既設管の酸化層が除去できたことを確認する方法としては浸透探傷試験および磁性検査がある。図2に酸化層の一部が残存したまま溶接を行い、溶接後の浸透探傷試験で亀甲状の指示模様が検出された事例を示す²⁾。指示模様が酸化層によるものであれば問題ないが、溶接によって発生した割れの可能性があるため、指示模様が検出された部分を研削して、再度浸透探傷試験を行い、指示模様がないことを確認する必要がある。

3. 窒化層と溶接中に発生する火花

高温で長時間使用した輻射管では、外面側に窒化層が発生する可能性がある。窒化層が残存した状態で溶接を行うと、火花が発生するなど溶接欠陥が発生しやすいため、窒化層を除去する必要がある。図3に窒化層が残存した状態でビード・オン・プレートした際に火花が発生した状況を示す³⁾。溶接前に既設管の窒化層が除去できたことを確認する方法としては、ビード・オン・プレートおよび図4のような断面マクロ組織観察がある³⁾。

4. 浸炭した既設管の溶接方法

高温で長時間使用した輻射管および連絡管では、内面側に浸炭層が発生する可能性がある。浸炭層が残存した状態で溶接を行っても溶接割れが発生するため、浸炭層を除去する必要がある。溶接前に既設管の浸炭層が除去できたことを確認する方法としては磁性検査がある。そして、浸炭層

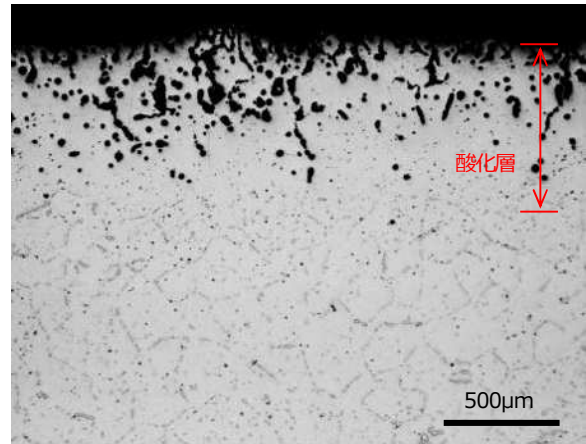


図1 輻射管の外面側の断面マイクロ組織



図2 輻射管の溶接後における浸透探傷試験の状況

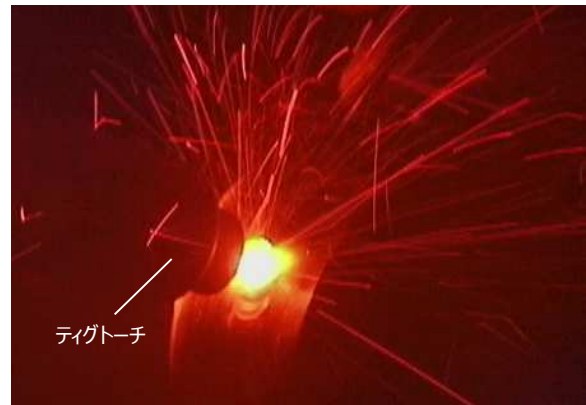


図3 窒化層が残存した状態でのビード・オン・プレート



図4 窒化層を有する輻射管の断面マクロ組織

が厚く、浸炭層を除去した後の肉厚がMSW (Minimum Sound Wall thickness)を下回る場合は、既設管の浸炭が軽微なところまで更新範囲を広げる必要がある。しかしながら、材料の在庫などの問題から更新範囲を広げられない場合がある。図5に浸炭した輻射管の断面マクロ組織を示す。内面側の白色部がおおよそその浸炭層で、酸化層と浸炭層を

除去した後の肉厚が MSW を下回るため、バタリング溶接によって肉厚を確保する必要がある。図 6 に外面バタリング法の要領を示す。浸炭層を除去するために既設管の内面側を研削することから、バタリング溶接を内面側にする方法も考えられるが、その方法ではバタリング溶接と浸炭層の境界付近で割れが発生する。また、浸炭層を除去する前に外面バタリング溶接を行うと、内面側の浸炭層で割れが発生する。これらのことから、内面側の浸炭層を除去した後には外面バタリング溶接を行う必要がある。

5. 外面側の溶接止端部に発生する割れの補修方法

高温で長時間使用した連絡管の溶接止端部では、経年変化にともなう割れが発生する場合がある。その割れを除去し、溶接補修を行う場合には、溶接が可能か否かを事前に

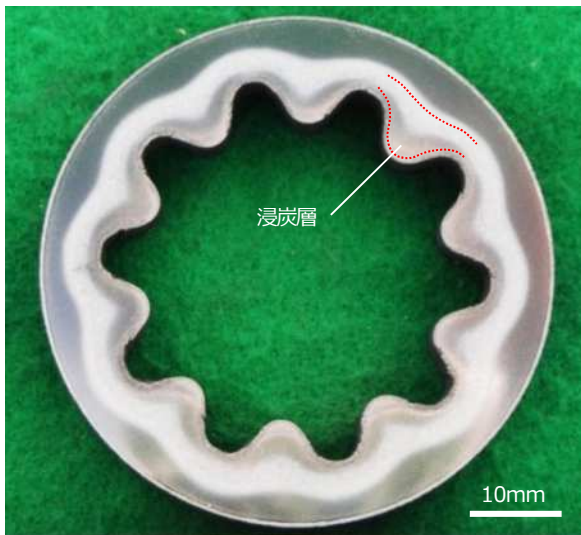


図 5 浸炭した輻射管の断面マクロ組織

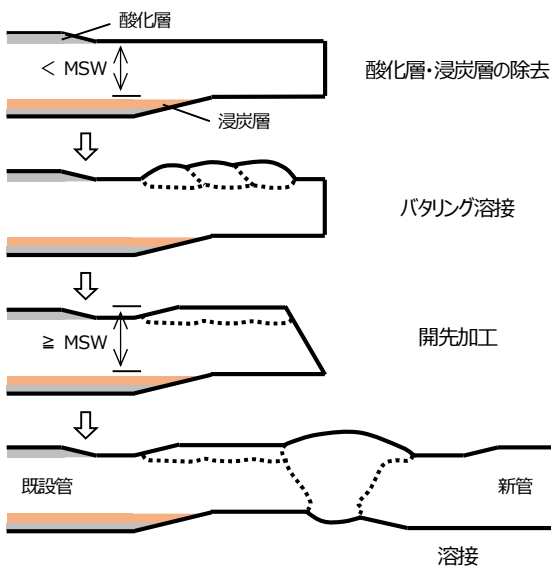


図 6 外面バタリング法の要領

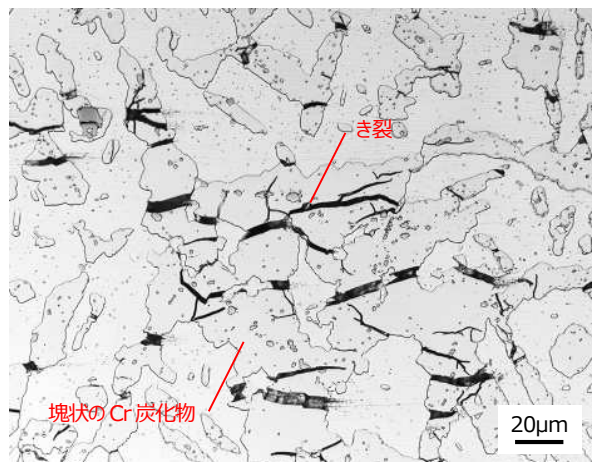
確認する必要がある。図 7 に溶接止端部の割れを想定して母材部分の周方向に溝状の加工を行い、溶接補修試験を行った事例を示す²⁾。溶接補修後の浸透探傷試験では指示模様は検出されていないが、溶接補修ビード下の浸炭層の断面マイクロ組織観察では塊状に析出した Cr 炭化物に無数のき裂が確認された。これらのき裂は浸炭によって析出した塊状の Cr 炭化物に溶接の熱応力が加わったことで発生したものと推測された。この結果から、ここでは溶接止端部の割れを除去して溶接補修を行うことはできないと判断し、部分更新による溶接補修を適用した。

6. 新管側の溶接金属に発生する凝固割れ

高温で長時間使用した連絡管と新管の溶接において、溶加棒に Ni-Cr-Co-Mo 合金である 617 を用いたところ、24 か所のうち 1 か所のみで溶接金属に割れがみられた。図 8 にその状況を示す。割れは溶接金属の新管側にみられ、割れを除去して再び溶接を行っても同様の割れがみられた。割



(a) 溶接後の浸透探傷試験の状況

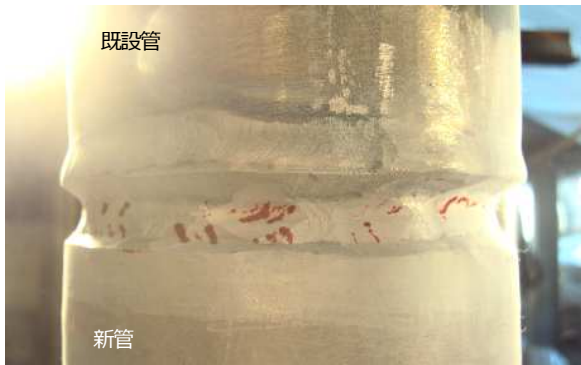


(b) 溶接補修ビード下の浸炭層の断面マイクロ組織

図 7 連絡管の外面側の溶接補修試験



(a) 最初の溶接で発生した割れ



(b) 2回目の溶接で発生した割れ

図8 連絡管の溶接後における浸透探傷試験の状況

それは、その発生位置から母材の希釈にともなう凝固割れと推測された。そして、割れが発生した短管および割れが発生しなかった短管に、617 および母材の共金となる溶加棒で溶接を行ったところ、割れがみられたのは、割れが発生した母材と溶加棒が617の組合せのみであった。この割れの対策としては、溶加棒を617ではなく母材の共金にすることが有効であった。このように母材の希釈の影響によって凝固割れが発生する場合は使用した溶加棒とは異なる組成のものに変更すると凝固割れが発生しなくなる場合がある。

7. 新管同士の溶接でつなぎ部に発生する横割れ

輻射管および連絡管の新管同士の溶接において、溶加棒に Ni-Cr-Co-Mo 合金である617を用いた際に初層の裏波ビードのつなぎ部に横割れが発生する場合がある。図9に輻射管の溶接時に発生した横割れの状況を示す⁴⁾。横割れは、初層のつなぎ部の内面側に多くみられ、低融点元素などが偏析したデンドライト境界に沿って進展していることから、溶接金属が凝固する際に発生する熱収縮応力が完全に凝固していないデンドライト境界に負荷されて発生する凝固割れと推定された⁴⁾。この凝固割れの対策としては、溶加棒を617ではなく母材の共金にすること、およびそれに加え

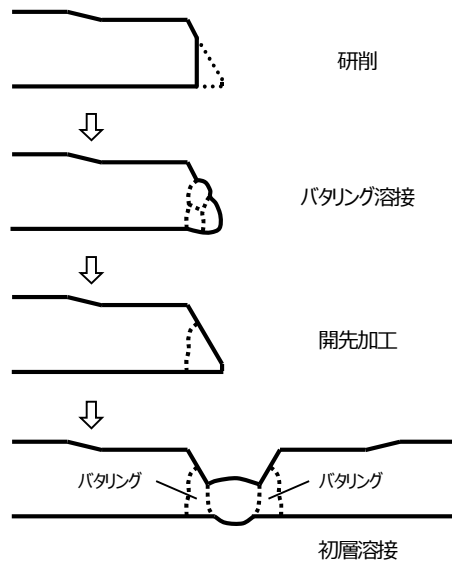


(a) 外面側の横割れ

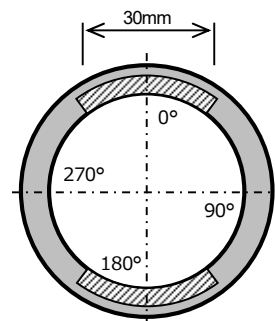


(b) 内面側の横割れ

図9 輻射管の溶接時に発生した横割れの状況



(a) 手順



(b) バタリング溶接の範囲

図10 部分バタリング法の要領

て部分バタリング法を適用することが有効であった⁴⁾。図10に部分バタリング法の要領を示す。初層のつなぎ部となる開先部をバタリングによる溶接金属に置き換えることで、

初層のつなぎ部での母材の希釈を低下させる方法である。なお、初層のつなぎ部が1か所の場合は部分バタリング法を適用する部位も1か所でよい。

8. 連絡管の初層溶接後に発生する液化割れ

高温で長時間使用した連絡管と新管の溶接では、後述する延性低下割れはほとんど発生しないが、図11に示すような溶接止端部に微細な割れが発生する場合がある³⁾。微細な割れは初層溶接の既設側の溶接止端部に多数検出され、それらを除去しても、内部から別の割れが検出されるため、割れを除去して溶接することはできない。これらは溶接によってボンド部近傍の熱影響部に発生した液化割れと推測された⁵⁾。対策としては、溶接前に固溶化熱処理(1150°C-1h)を行うことで液化割れを防止できる。実プラントでは溶接前に固溶化熱処理を行うようにしてから、液化割れが発生する確率は5%未満になった。

9. 輻射管の溶接時に発生する延性低下割れ

高温で長時間使用した輻射管と新管の溶接では、輻射管の経年変化の影響によって延性低下割れが発生する場合がある。図12に延性低下割れの再現試験の状況を示す。延性低下割れは初層溶接時の溶接を停止した際に発生する場合が多く、割れは裏波ビードの止端部に沿って進展している³⁾。対策としては、既設管の性能を回復させる固溶化熱処理法、ならびに溶接時の軸方向の拘束を低減する圧縮応力負荷法および短管挿入法がある。しかしながら、これらの対策を行っても、Niを43~45mass%含有した耐熱鋳鋼で延性低下割れ感受性の高い既設管では延性低下割れが発生する場合がある。そこで、延性低下割れの防止策として、固溶化熱処理法の条件を見直した場合の検証結果および新たに考案した内面バタリング法を示す。

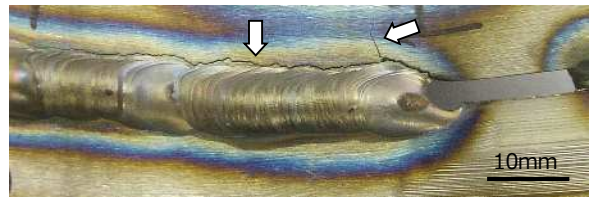
9.1 固溶化熱処理法

延性低下割れは図12に示すように生成相に沿って進展することから、固溶化熱処理の保持温度と保持時間を増加させた場合に生成相の面積率がどのように変化するかを検証した。生成相には図13に示すように $M_{23}C_6$ と η 相がある⁶⁾。図14に生成相の面積率におよぼす固溶化熱処理の影響を示す⁶⁾。 $M_{23}C_6$ の面積率はLMP(Larson-Miller Parameter)が30.0までほぼ一定で、それ以上では増加傾向を示し、 η 相の面積率はLMPの増加とともに減少傾向を示した。次に固溶化熱処理によって高温での延性がどの程度回復するかを検証した。試験温度が500°C付近でもっとも延性の回

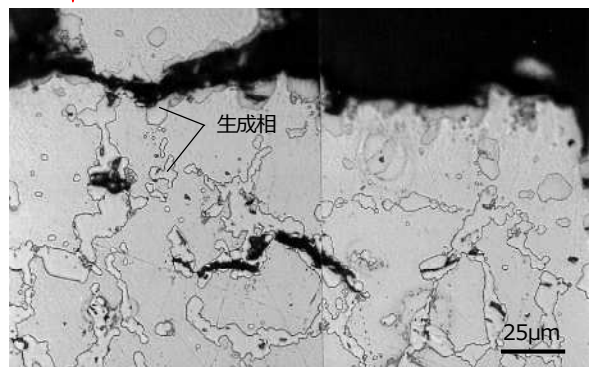
復を評価しやすいことから⁷⁾、高温引張試験の試験温度を300、500および700°Cの3条件とした。図15に延性におよぼす固溶化熱処理の影響を示す⁶⁾。延性はLMPが29.5~30.0でやや増加傾向を、それ以上では減少傾向を示した。延性がやや増加したのは断面マイクロ組織観察の結果からネットワーク状の生成相が分断されたことによると推測された。そして、これらの結果などを参考に固溶化熱処理の条件を1190°C-3hと1250°C-1hとし⁷⁾、再現試験を行ったがいずれも延性低下割れを防止することはできなかった。



図11 連絡管の溶接後における浸透探傷試験の状況



(a) 延性低下割れの発生位置(内面側)



(b) 断面マイクロ組織

図12 輻射管の延性低下割れの再現試験

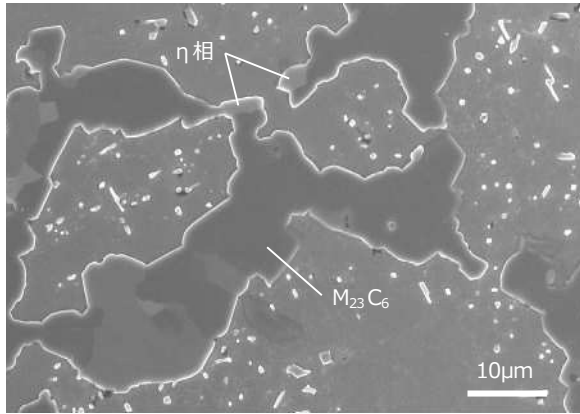


図 13 長時間使用した輻射管の断面 SEM 像

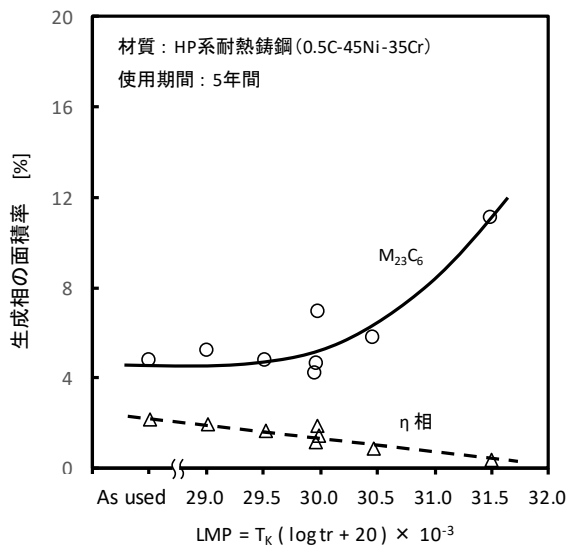


図 14 生成相の面積率におよぼす固溶化熱処理の影響

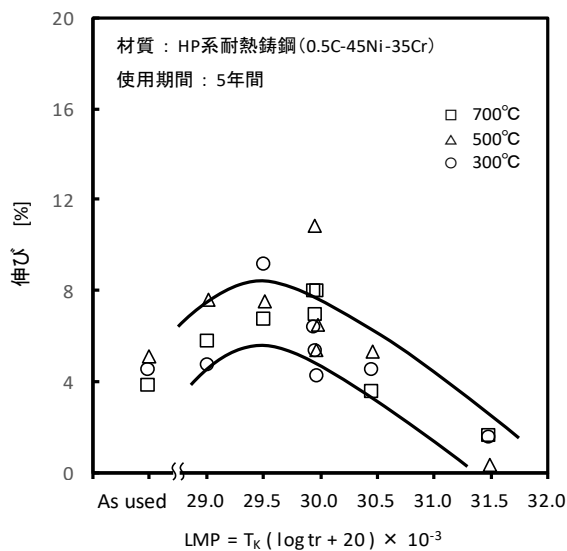


図 15 延性におよぼす固溶化熱処理の影響

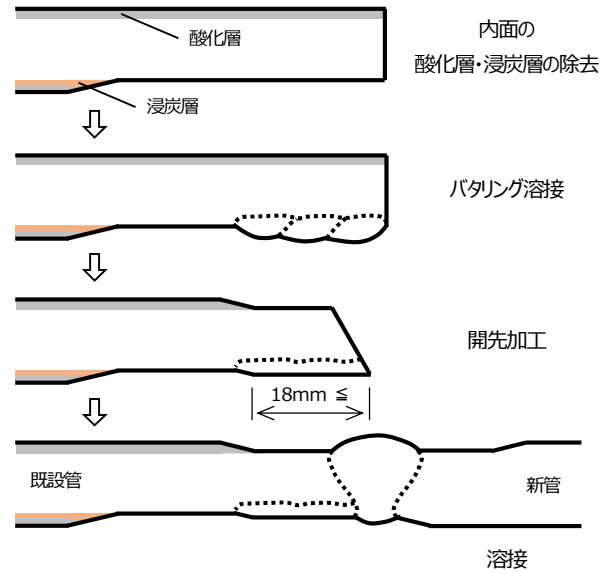


図 16 内面バタリング法の要領



図 17 内面のバタリング溶接止端部に発生した割れ

9.2 内面バタリング法

内面バタリング法は、延性低下割れが発生しやすい開先内面を延性が比較的良好な溶接金属に置き換えることで、延性低下割れを防止する方法である。図16に内面バタリング法の要領を示す。内面バタリング法でバタリング幅を10mm未満とした場合は、開先部に発生する延性低下割れを防止できたが、図17に示すような内面のバタリング溶接止端部に割れが発生する可能性があることから、バタリング幅を18mm以上にする必要がある^{3,6)}。

10. おわりに

高合金耐熱鋼の溶接補修技術として、分解炉の輻射管および連絡管における溶接にともなう問題とその対策の事例を紹介した。類似案件の溶接補修の参考にしていただけると幸いです。

参考文献

- 1) 篠崎賢二, 黒木英憲, 中尾嘉邦, 西本和俊, 乾正弘, 高橋誠 : 長時間使用した Nb, Mo および W を含む HP 系耐熱鋳鋼の溶接性劣化, 溶接学会論文集, Vol.16, pp.223-232 (1998)
- 2) 中野正大 : プラント機器の補修溶接技術と再発防止策, 溶接技術, Vol.67(6), pp.65-69 (2019)
- 3) 中野正大, 安西敏雄 : エチレン製造装置の分解炉に発生する損傷とその対策, 高田技報, Vol.21, pp.32-37 (2011)
- 4) 中野正大, 山口ちひろ, 安西敏雄 : HP 系耐熱鋳鋼の溶接金属に発生する横割れとその対策, 高田技報, Vol.29, pp.14-19 (2019)
- 5) 吉田健 : インコロイ 800H 既設配管の溶接技術, 配管技術, 増刊号, pp.41-46, (1999)
- 6) 中野正大, 安西敏雄 : 経年変化した改良型 HP 系耐熱鋳鋼の延性低下割れとその対策, 溶接学会九州支部講演論文集, Vol.10, pp.21-27 (2013)
- 7) Katsunobu HASEGAWA : REPAIR WELDING AND METALLURGY OF HP-MODIFIED ALLOY AFTER LONG TERM OPERATION, METAL 2001, Vol.5, pp.15-17 (2001)