



K. Mori

超高強度鋼部材の次世代 スマートホットスタンピングの開発

森 謙一郎*

キーワード：ホットスタンピング，超高強度鋼部材，スマート化

1. 研究の目的と背景

自動車の燃費を向上させるため、自動車部材を軽量化することが望まれている。電気自動車の生産が増加するが、電気自動車は重いバッテリーを積載しているためにエンジン自動車よりも重量増になっており、軽量化がいつそう望まれている。一方、自動車の衝突安全性を高めることも必要になってきている。軽量化と衝突安全性の両者を満足するために部材の高強度化が必要になってきている。

軽量材料としてはアルミニウム、マグネシウム、炭素繊維強化プラスチックなどがあり、自動車部材に適用されている。しかしながら、価格面および生産量から鉄系材料が有利であり、冷間プレス成形される高張力鋼板の使用が自動車車体材料として増加している。高張力鋼板の強度は著しく向上しており、引張強さが 1GPa を超える超高張力鋼板も開発されるようになってきており、強度を比重で除した比強度は軽量材料と同程度になってきている。このため、自動車部材への高張力鋼板の適用が盛んに行われているが、成形荷重は大きく、スプリングバックが大きくなって形状凍結性が低く、成形性も低く、金型摩耗が顕著になり焼付きも生じやすい。このため、引張強さが 1.2GPa を超える超高張力鋼板の冷間プレス成形は困難である。

超高強度鋼自動車部材の製造方法として、ホットスタンピングが注目されている。ホットスタンピングは、加熱した鋼板をプレス成形し下死点で金型を保持することによって成形品を焼入れし、1.5GPa 程度の引張強さを有する超高強度鋼部材を製造する方法である。

超高強度鋼部材のホットスタンピング¹⁾では、図 1 に示すように焼入れ用鋼板を高温炉で加熱して、金型に搬送して成形し、下死点で 10 秒程度保持することによって急冷して焼入れする。焼入れでは一般に成形品を水または油の中に入れることによって冷しているが、ホットスタンピングでは加熱していない金型で保持することによって焼入れをしており、ダイクエンチング(die quenching)と呼ばれる。ブランクを高温炉で 900°C 程度に加熱してオーステナイトに変態させ、ダイクエンチングで急冷して硬いマルテンサイトに変態させて成形品の引張強さを 1.5GPa 程度にしている。マルテンサイト変態を生じさせるためには、オーステナイト変態するまで加熱すること、またその

後冷却速度を 30°C/s 以上にすることが必要である。ホットスタンピングでは素板の強度は高くないが、ダイクエンチングによって成形品を高強度化している。また、下死点保持を行っているため、成形品のスプリングはほとんどなく、形状凍結性が高い。さらに、海外において鋼板の入手が比較的容易であり、海外生産に適した加工法である。

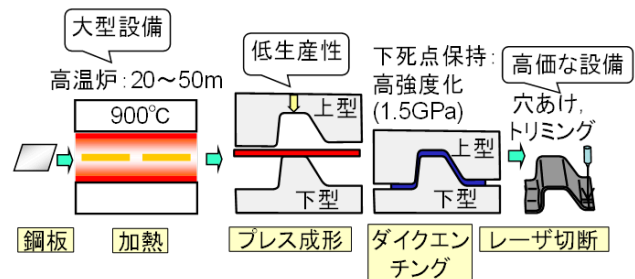


図 1 超高強度鋼部材のホットスタンピングにおける加工工程

焼入れされた成形品は非常に高強度であるため、冷間せん断加工によって穴あけ、トリミングを行うと、金型の摩耗が大きくなり、切り口面の遅れ破壊も問題になる。このため、一般にはレーザー切断によって穴あけ、トリミングが行われている。

ホットスタンピングは 1.5GPa 級超高強度鋼自動車部材を成形できる加工として世界的に生産が拡大しているが、現状のホットスタンピングは次のような問題点を有している。

- 1) 成形を連続的に行うためには加熱したブランクを連続的に供給する必要があり、20-50m の高温炉が非常に大きくなり、設備が大型化して高価である。
- 2) ダイクエンチングのために 10 秒程度の下死点保持が必要になり、1 分間に 2 あるいは 3 ショット程度であり、生産性が低い。
- 3) トリミング、穴あけをレーザー切断によって行っているため、設備が高価で生産性も低い。
- 4) ほとんどの鋼板は 22MnB5 であり、強度が 1.5GPa に限定されており、さらに酸化防止のためのアルミニウムまたは亜鉛めっき処理鋼板はコスト高になる

* 豊橋技術科学大学 名誉教授

5) 小型部品では高温炉から取り出すと急激に冷却されて熱間加工ではなくなるため、比較的大型である自動車ボディの骨格部材に適用が限定されている。

本研究では、次世代スマートホットスタンピングを開発するための基盤技術を研究し、これらの問題点の解決を図った。

2. 通電加熱ホットスタンピングにおける加熱直後のブランキング²⁾

鋼板に大電流を通電すると急速に加熱できるため、ホットスタンピングへの適用が検討されている。通電加熱ホットスタンピングは、大型加熱炉が必要なくなって電源だけになり、装置がコンパクト化される。通電加熱ホットスタンピングは一部メーカーで既に実生産に用いられており、設置面積および設備費が加熱炉の 1/10 になるという報告がある³⁾。日本における生産では、現状の大型ホットスタンピングを導入するのが困難になってきている。

通電加熱ホットトリミングは鋼板に直接加熱するためエネルギーコストも高く、通電とダイクエンチングは両方も数秒程度であるため、それらを同時に行うと生産時間が半分になる。通電加熱では、図 2(a) に示すように鋼板の両端を電極と接触させて通電するため、矩形鋼板しか均一に加熱できない問題があり、矩形に近い製品形状でない材料歩留まりが低下する。また、電極と接触している付近は温度が上昇しないため、非加熱部によって成形性が低下する場合もある。そこで、図 2(b) に示すように通電加熱直後にブランキングを行った。

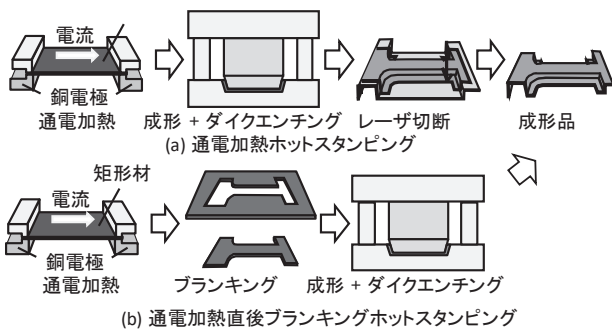


図 2 通電加熱ホットスタンピングにおける加熱直後のブランキング

通電加熱直後ブランキングにおけるスクラップ、ブランク、成形品を図 3 に示す。成形品は割れを生じることなく成形されている。通電加熱は短時間であり、表面の酸化スケールは比較的少ない。

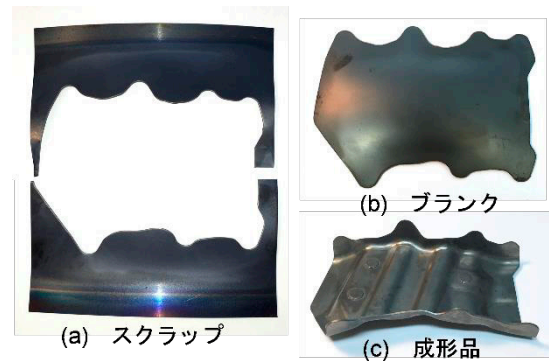


図 3 通電加熱直後ブランキングにおけるスクラップ、ブランク、成形品

通電加熱直後ブランキングにおける成形品フランジ部の肉厚減少率を図 4 に示す。ブランキングなしでは板厚減少は大きいですが、ブランキングを行うことによって板厚減少は小さくなっており成形性が向上している。

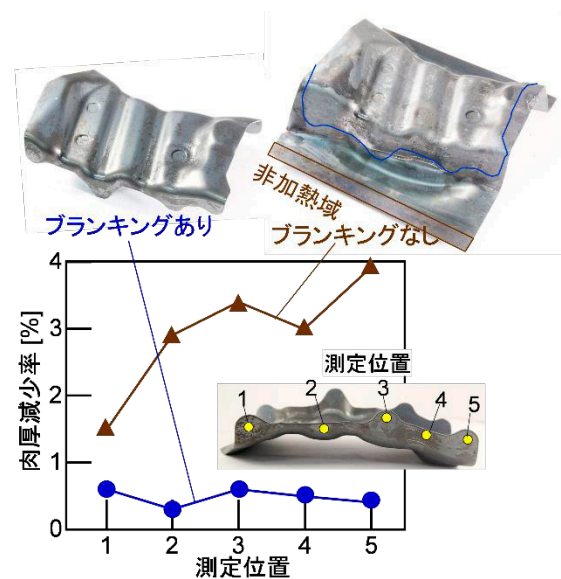


図 4 通電加熱直後ブランキングにおける成形品フランジ部の肉厚減少率

3. リン酸を用いた超音波洗浄による酸化スケールの除去⁴⁾

アルミニウムめっき処理鋼板はホットスタンピングで最も多く使われており、酸化スケールが発生しないが、高価である。金属間化合物を表面に生成して酸化を防止しているが、5分程度の加熱時間が必要となり、これが加熱炉が大きくなる原因である。通電加熱は急速加熱であり、アルミニウムめっき処理鋼板を使用することができなく、非めっき処理鋼板が使われている。非めっき処理鋼板はアルミニウムめっき処理鋼板と比べて低価格である。非めっき処理鋼板の酸化スケールを除去するために、ショットブラスト処理が一般的に使われているが、通電加熱は急速加熱であるため、生成される酸化皮膜は薄く、薄い酸化膜の除去としてリン酸を用いた超音波洗浄を開発した。

非めっき処理鋼板において、炉加熱、ショットブラスト処理と通電加熱、リン酸で超音波洗浄された成形品の表面の比較を図5に示す。通電時間3秒で910℃に加熱された鋼板をハット曲げ成形した成形品を40℃、pH1のリン酸で2分超音波洗浄した。通電加熱と比較して240秒の炉加熱では成形品表面は粗くなった。また、ショットブラストを行うと成形品表面に小球が衝突して塑性変形が起こり、また削られるため成形品が粗くなった。しかしながら、リン酸で超音波洗浄を行うと炉加熱でショットブラストした成形品の10分の1程度の粗さに抑制できた。リン酸と超音波洗浄は炉加熱においても酸化スケールを除去できる。

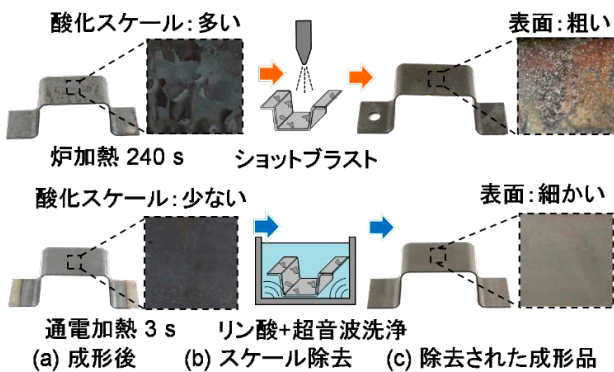


図5 非めっき処理鋼板における炉加熱、ショットブラスト処理と通電加熱、リン酸で超音波洗浄された成形品の表面の比較

炉加熱成形品のショットブラストと、通電加熱成形品のリン酸を用いた超音波洗浄においてフランジ部のそり角を図6に示す。ショットブラストによる除去では、成形品が塑性変形を受けてフランジ部にそりが発生するが、リン酸を用いた超音波洗浄ではフランジ部のそりはほとんど発生しなく、ゆがみが小さい成形品が得られる。

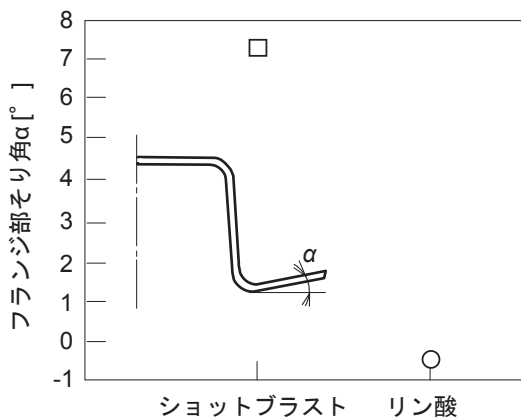


図6 リン酸を用いた超音波洗浄とショットブラストによる成形品のフランジ部のそり

4. 簡易型直接水冷を用いたホットスタンピング⁵⁾

ホットスタンピングでは、ダイクエンチングを行うために、現状の生産では1分間に2あるいは3ショットであり、生産性が低い。1ショットにおける各工程のおおよその時間を図7に示す。ダイクエンチングの時間が長く、これを短くすると生産性が改善される。ダイクエンチングでは、金型によって焼入れを行っているため、水および油焼入れより冷却速度が小さく、10秒程度の保持時間が必要になる。

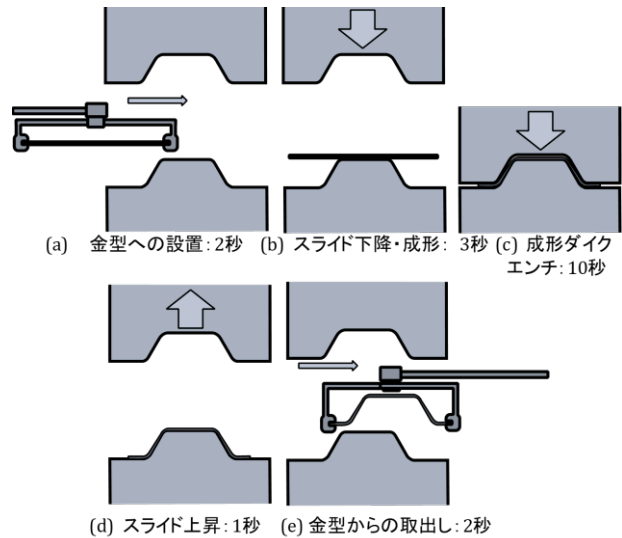


図7 1ショットにおける各工程のおおよその時間

下死点保持時間を短縮するために、図8に示すように成形品に水を直接かけることが行われている⁹⁾。直接水冷方式では、金型に水の排出と吸入口を設けて下死点到達した直後に水を循環させて急冷を行っている。金型表面には微小な凹凸が付けられており、その凹部に水、水蒸気が循環する。プランクと金型の間に隙間ができるような部分でも、隙間に冷却水が充填されるため冷却速度が小さくなることはない。しかし、短時間である下死点保持中に水の排出と吸入を行うのは容易ではない。また、金型表面の凹凸が成形品の表面に転写して表面品質が低下する場合もある。

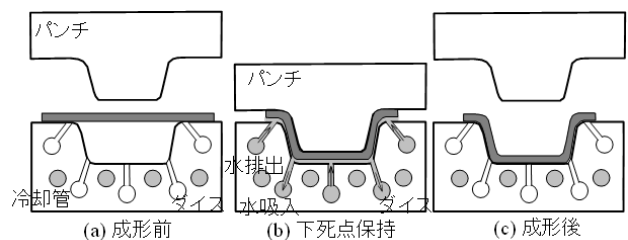


図8 下死点保持時間を短縮する直接水冷

簡易型直接水冷として、図9に示すように水槽内に金型を設置し、成形とともに成形品を水没させる方法を開発した。この方式では、金型構造が単純になり、下死点保持時間を短縮できる。

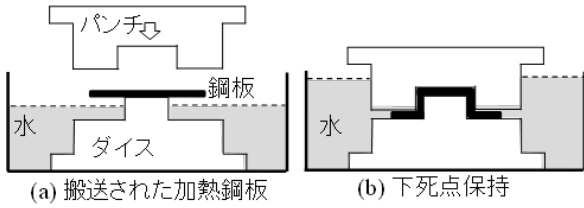


図9 下死点保持時間を短縮する簡易型直接水冷

ハット曲げ成形において、簡易型直接水冷ありとなしの断面の平均硬さの比較を図10に示す。ここで、 t は板厚を示し、板厚が大きいほど焼入れに必要な下死点保持時間が長くなる。成形品の角部は金型と直接接触しないため焼入れされにくい。直接水冷ではこの部分に水が浸入して金型と直接接触しない部分も焼入れされる。簡易型直接水冷を使うことによって下死点保持時間を短縮できることが分かる。

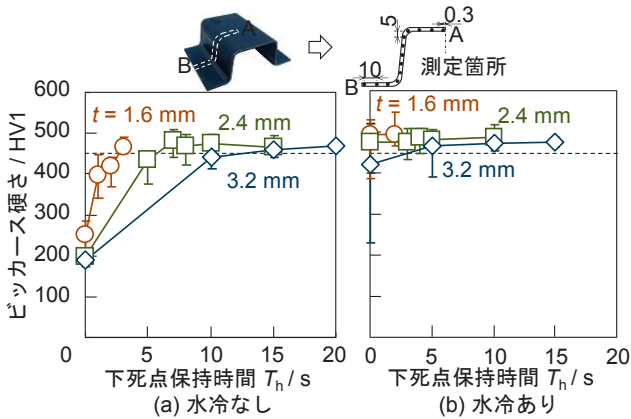


図10 ハット曲げ成形における簡易型直接水冷ありとなしの断面の平均硬さの比較

5. 部分成形 2 段ホットスタンピングによる強度分布を有する部材のテーラードテンパリング⁷⁾

ダイクエンチングされたホットスタンピング成形品では、通常全体が1.5GPa 程度の高強度になるが、局部だけを高強度にしたいものもある。たとえば、高強度が必要な部分だけ焼入れを行って、強度が必要ない部分では焼入れをしないで延性、じん性を確保したい部材はセンターピラーなどにある。また、焼入れを行わない部分では冷間トリミングや穴抜きなどが可能になる。

部材の強度分布を制御するテーラード技術を図11に示す。部分加熱では加熱炉内の温度制御や部分通電加熱によって高強度が必要でない部分をオーステナイト温度 A_{c3} 以下にして、部分冷却では冷却速度を遅くしてそれぞれマルテンサイト変態を防止している。テーラード溶接ブランク

は材質、板厚の異なった板材を溶接したものであり、テーラード圧延ブランクは圧延中のロール間隙を調節して板厚分布を制御している。

現状の部分冷却では、高延性部と接触する金型にヒーターを内蔵して、部材の冷却速度を小さくしてマルテンサイト変態を防止しており、テーラードテンパリングと呼ばれている。高延性部を得るためにフェライト変態を生じさせる必要があるが、徐冷するために保持時間が長くなって生産性が低くなる問題がある。また、金型にヒーターを内蔵して温度制御しており、金型の構造および温度制御が複雑になる。

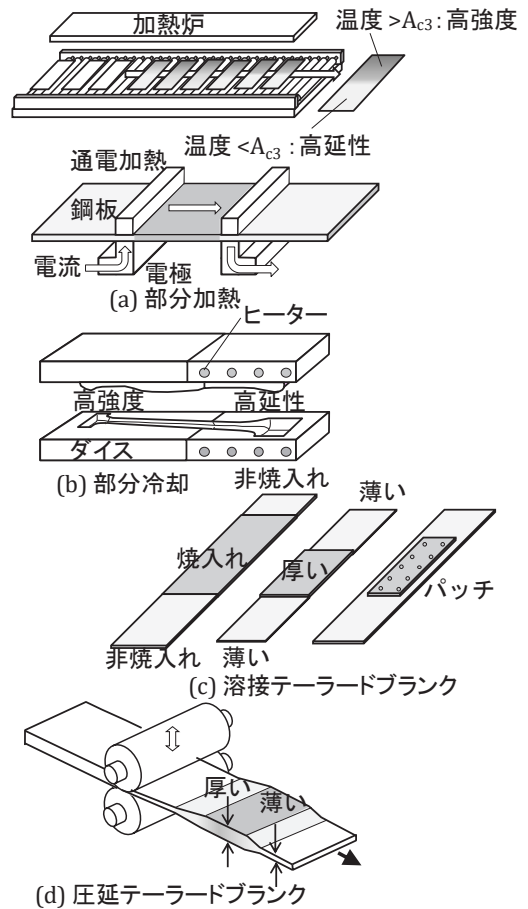


図11 ホットスタンピングにおける部材の強度分布を制御する各種テーラード技術

生産性を向上するために、図12に示す部分成形 2 段ホットスタンピングを用いたテーラードテンパリングを開発した。この方法では、均一に加熱した鋼板を部分金型で1段目に成形し、2段目に全体金型で成形する。1段目の部分金型と接触する部分は2段目も金型と接触して急冷され高強度部になり、1段目の部分金型と接触しない部分は急冷させなくて高延性部になる。1段目と2段目の下死点保持を同じ時間にすると生産性は高まり、金型にヒーターを内蔵していない。

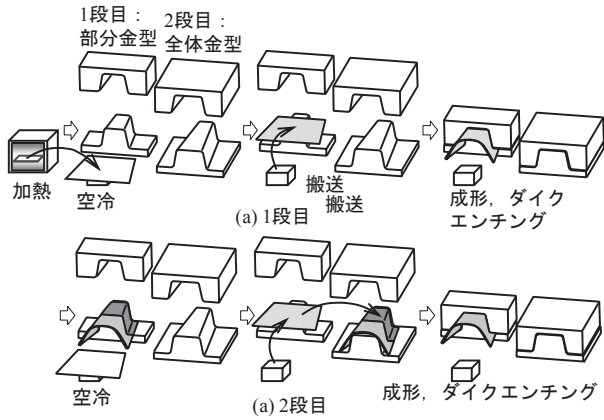


図 12 部分成形 2 段ホットスタンプングを用いたテーラードテンパリング

部分成形 2 段ホットスタンプングの成形品を図 13 に示す。1 段目で高強度部が成形されて 2 段目で全体が成形されている。

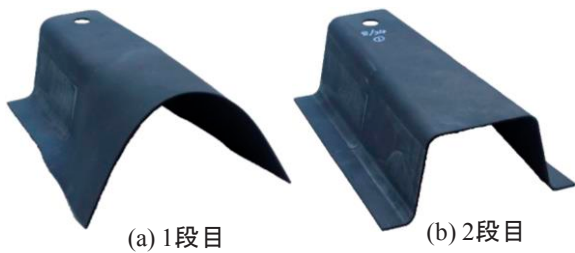


図 13 部分成形 2 段ホットスタンプングの成形品

成形品の長手方法の硬さ分布を図 14 に示す。1 段目および 2 段目の空冷時間は 20 秒、下死点保持時間は 5 秒であった。高強度部は約 500HV1、高延性部は約 200HV1 のテーラード部材が得られている。

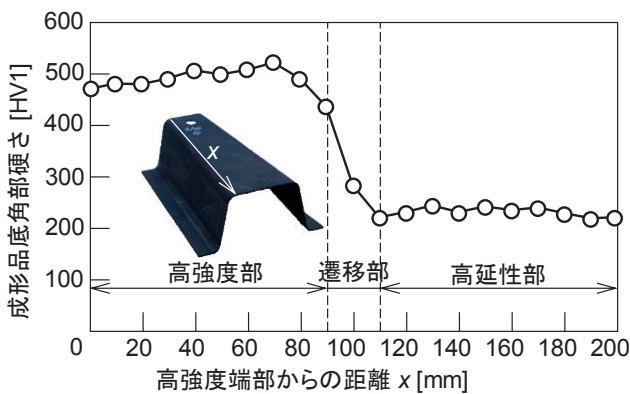


図 14 成形品の長手方法の硬さ分布

6. ホットトリミングにおける遅れ破壊挙動⁸⁾

ホットスタンプされた成形品は非常に高強度であるため、トリミングや穴あけ加工は一般にレーザー切断で行われているが、低い生産性や高価な設備が問題になっている。冷間せん断加工の適用が望まれているが、工具寿命が短くなるだけでなく、切口面の低い表面性状、遅れ破壊などの問題がある。このため、ホットスタンプにおいて、成形終了直後にせん断加工を行うホットトリミングの適用が増加している。ホットトリミングを用いることによってレーザー切断をできるだけ少なくしてコストと生産性を向上させている。高温でせん断加工を行うため、加工荷重が低減されて遅れ破壊も防止される。しかしながら、成形時に金型と接触して温度がかなり低下した状態でせん断される場合もあり、レーザー切断よりも遅れ破壊の危険性が高くなる。ホットトリミングにおける遅れ破壊に及ぼすせん断加工時の温度の影響を調べた。

ホットトリミング実験方法を図 15 に示す。アルミめっきホットスタンプ用鋼板を電気炉で 910℃まで昇温して 2 分保持し、約 7 秒で金型へ搬送し、金型と鋼板を接触させて目標のトリミング温度 T まで強制冷却した後トリミングし、上下パンチで 10 秒間はさみ込むことでダイクエンチングを行った。金型と鋼板を接触させてホットトリミング中の温度低下を再現している。トリミング後陰極水素チャージによって遅れ破壊の起点となるクラックを発生させた。

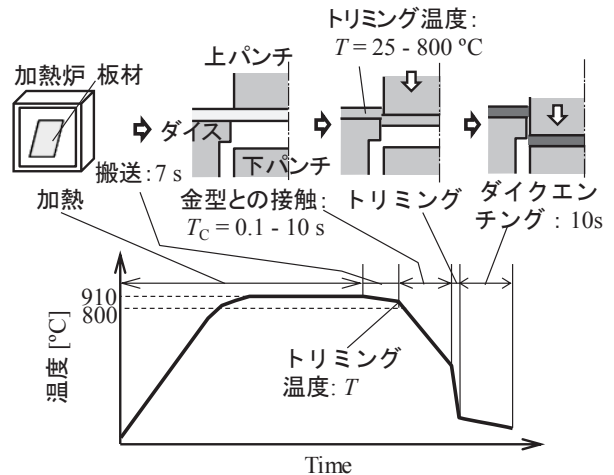


図 15 ホットトリミング実験方法

クリアランス比 10%における遅れ破壊の起点となるクラックの発生に及ぼすトリミング温度の影響を図 15 に示す。板厚 1.6mm では 400℃以下、板厚 1.0mm では 600℃以下でクラックが生じており、温度が低下した状態でトリミングを行うのは遅れ破壊の危険性が高くなる。

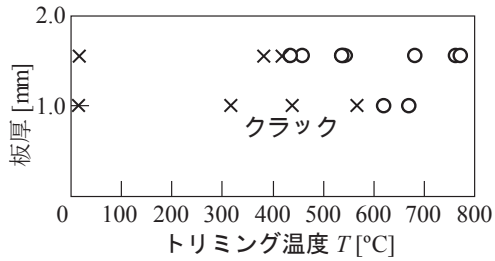


図 16 クリアランス比 10%における遅れ破壊の起点となるクラックの発生に及ぼすトリミング温度の影響

7. まとめ

現状のホットスタンピングの問題点を解決するために、次世代スマートホットスタンピングの基盤技術を研究した。通電加熱ホットスタンピングは設備の低価格化とコンパクト化のために期待されており、実用化するために加熱直後ブランキングを開発して成形性を向上させ、リン酸を用いた超音波洗浄を提案して非めっき処理鋼板の酸化スケールを効率的に除去できしかも成形品のゆがみを防止した。また、水槽内に金型を設置して成形品を水没させる簡易型直接水冷を開発して下死点保持時間を短縮し、生産性を向上させた。さらに、部分成形 2 段ホットスタンピングを開発して強度分布を有するテーラード部材を効率的に生産できるようにし、金型のヒーターをなくした。一方、レーザー切断をできるだけ少なくするために成形直後にせん断するホットトリミングが行われており、ホットトリミングにおける遅れ破壊に及ぼすせん断加工時の温度の影響を調べた。

ホットスタンピングは新しい技術であり、残された問題点も多いため、今後も新しい技術開発が行われると思われる。

謝 辞

本課題は公益財団法人天田財団の平成 27 年度重点研究開発助成 A によって行われたものであり、ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森謙一郎：ホットスタンピング入門，(2015)，日刊工業新聞社。
- 2) T. Maeno, K. Mori, T. Ogihara, T. Fujita: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97-9-12(2018), 3827-3837.
- 3) 清水純・森修・岩沼忠志・清水太一・西尾和真: Subaru Technical Review, 38(2011), 129-134.
- 4) N. Nakamura, K. Mori, T. Komatsu, T. Hayashi, T. Suzuki, T. Okazaki, Y. Abe: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118-3-4(2022), 1227-1238.
- 5) Y. Nakagawa, K. Mori, T. Maeno, Y. Nakao: Procedia Manufacturing, 15(2018), 1111-1118.
- 6) N. Nomura, H. Fukuchi, A. Seto: Proceedings of 5th International Conference of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, (2015) Toronto, 549-557.
- 7) Y. Nakagawa, K. Mori, Y. Suzuki, Y. Shimizu: Materials and Design, 192(2020), 108704.
- 8) Y. Nakagawa, K. Mori, T. Maeno, R. Umemiya: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105-12 (2019), 5081-5090.