大型鍛鋼品ポリマー焼入れにおける ポリマー水溶液の劣化が焼割れ発生に及ぼす影響

有川 剛史^{*1}, 朴 海洋^{*2}, 松宮 知朗^{*3}, 今村 亮祐^{*4}

沖田 圭介^{*3}, 松田 真理子^{*1}, 黒河 周平^{*5}

Influence of deterioration of polymer solution on quenching crack in polymer quenching process for large forged products

Takefumi ARIKAWA ^{*1}, Haeyang PAK ^{*2}, Tomoaki MATSUMIYA ^{*3}, Ryosuke IMAMURA ^{*4},

Keisuke OKITA ^{*3}, Mariko MATSUDA ^{*1} and Syuhei KUROKAWA ^{*5}

^{*1,*4} Technical Development Department, Steel Casting & Forging Division, KOBE STEEL, LTD.

2-3-1 Shinham Arai-cho, Takasago-shi, Hyogo 676-8670, Japan

^{*2,*3} Mechanical Engineering Laboratory, KOBE STEEL, LTD.

1-5-5 Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe-shi, Hyogo 651-2271, Japan

^{*5} Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Graduate School, Kyushu University

744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 819-0395, Japan

Received 20 August 2015

Abstract

One of the advantages of polymer quenching is that it has slower cooling characteristics than water quenching. On the other hand, in polymer quenching, unlike oil quenching and water quenching, cooling effect changes with an increase of the number of quenching times. When slow cooling performance in polymer quenching deteriorates, quenching cracks sometimes occur. One of the causes of quenching cracks is regarded as the stress that occurs due to quenching. Quenching stress is affected by a cooling rate. Therefore, in order to prevent the quenching crack in polymer quenching process, it is important to understand the relationship between the change of cooling performance with deterioration of polymer solution and the quenching stress. The change of slow cooling performance of polymer solution with the number of quenching times was investigated. The cooling performance was evaluated by heat transfer coefficient which was obtained from quenching experimentation. The slow cooling performance of deteriorated polymer solution decreases below the solution temperature of 350°C comparing to the fresh polymer solution at the same polymer concentration. As a result of quenching stress analysis, it was found that the largest quenching stress was obtained in deteriorated polymer quenching. In addition, in order to investigate the cause of the decrease of slow cooling performance, molecular weight of polymer solution was measured. The percentage of low molecular weight contents increased in deteriorated polymer solution. In order to confirm the effects of molecular weight, the cooling performance was investigated using deterioration-simulated polymer solution, which was prepared by mixing polymers having different average molecular weight. As a result, it was confirmed that the slow cooling performance of simulated polymer solution also decreased as well as actual deteriorated polymer solution.

Key words : Polymer quenching, Quenching crack, Polymer solution, Quenching stress analysis, Large forged product

No.15-00456 [DOI:10.1299/transjsme.15-00456], J-STAGE Advance Publication date : 17 December, 2015

^{*1} 正員, (株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 (〒676-8670 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-3-1)

^{*2} 正員, (株) 神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 (〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1-5-5)

^{*3} (株) 神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所

^{*4} (株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部

^{*5} 正員, 九州大学 大学院 工学研究院 教授 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail of corresponding author: arikawa.takefumi@kobelco.com

1. 緒 言

大型船用エンジンの主要部品である一体型および組立型クランク軸は高強度化の傾向にあり、焼入性に優れた低合金鋼を油焼入れして機械的特性を確保することが一般的である。しかし、油焼入れは火災発生の危険性や油煙による環境汚染などのリスクを伴うため、環境防災の観点から水溶性ポリマー液を用いたポリマー焼入れが代替として活用されている(石山他, 2010)。ポリマー焼入れの特徴は、水焼入れに対して広い温度域で緩冷却できることや、冷媒中のポリマーの濃度により冷却速度を制御できることとされている(横井他, 1996)。そのため、ポリマー焼入れは油焼入れよりも大きな冷却速度を有しながらも、水焼入れにおいてしばしば問題になる焼割れを防止しやすいと考えられている(三木田, 中林, 1986)。一方で、ポリマー焼入れは、油焼入れや水焼入れと異なり、焼入れ回数の増加に伴いポリマー水溶液の緩冷却特性が低下する現象が生じる(笠井, 2006, 内田, 中村, 2006)。緩冷却特性が低下すると焼割れが発生する場合があります、その製品の多くは廃却となる。この緩冷却特性の低下をポリマー水溶液の劣化と呼ぶ。

焼割れの発生要因の1つとして、焼入れに伴う発生応力が挙げられる。焼入れに伴う発生応力には、焼入液の冷却速度が影響を及ぼす。そのため、ポリマー焼入れにて焼割れを防止するには、ポリマー水溶液の劣化と焼入れに伴う発生応力の関係を把握することが重要である。これまでにも、ポリマー水溶液の冷却特性および焼割れに関する研究(三木田, 中林, 1986, 三木田, 中林, 1987a, 三木田, 中林, 1987b, 内田他, 2008, Eshraghi et al., 2010, Koudil et al., 2014)は行われているが、ポリマー水溶液の劣化と焼割れの関係について調査したものはない。一方、焼入れ中の発生応力の推定に関しては、数値解析を用いた取り組みが様々に行われている(井上, 有本, 1995, 寺崎他, 2006, 有本, 2013)。しかしながら、数値解析を大型品に適用した事例は少なく(福谷他, 2007, 柳沢他, 2014)、大型品のポリマー焼入れに適用した事例はない。

そこで、焼割れを発生させない安定した大型鍛鋼品のポリマー焼入れプロセスの確立を目指して、ポリマー水溶液の劣化と焼入れに伴う発生応力の関係について調査した。まず、ポリマー水溶液の焼入れ使用に伴う緩冷却特性の変化を明らかにした。さらに、熱処理応力解析を活用してポリマー水溶液の緩冷却特性の変化が焼入れに伴う発生応力に及ぼす影響を確認した。

2. ポリマー濃度が冷却特性に及ぼす影響

2・1 操業ポリマー水溶液におけるポリマー濃度の変化

ポリマー焼入れでの緩冷却特性にはポリマー濃度が影響を及ぼすとされている。そこで、実際の操業に使用したポリマー水溶液(操業ポリマー水溶液)のポリマー濃度を調査した。操業では液温を50℃に保持し、ポリマー水溶液を攪拌しながら焼入れを行う。操業ポリマー水溶液の使用日数に対するポリマー濃度の推移を図1に示す。なお、ここでの濃度とは屈折率計で計測した濃度のことを指している。図1に示すように、使用日数の経過に伴いポリマー濃度が高くなっていることがわかる。焼入れ時の水の蒸発やワークへの付着による液の持ち出しが発生するため、操業ではポリマー濃度が一定値以上になるように適宜ポリマーを継ぎ足している。そのため、ポリマー濃度が上昇する結果となっている。そこで、ポリマー水溶液の冷却特性に対するポリマー濃度の影響について調査した。

Fig.1 Number of used days of polymer solution vs. Polymer concentration

2・2 実験方法

ポリマー水溶液の冷却特性を調査するため焼入れ試験を行った。ポリマーには市販のポリ・アルキレングリコール系ポリマー (PAG) を用いた。実験装置概略を図 2 に示す。試験材にはインコネル 600 を採用し、試験体形状は $\phi 20\text{mm} \times 60\text{mm}$ の円柱形状とした。900℃に加熱した試験体をポリマー水溶液中に浸し、試験体の中心および上面、側面、下面から 1.5mm 位置の 4 箇所の温度変化を熱電対により計測した。焼入れ開始時のポリマー水溶液の温度 T_s はヒーターを用いて作業時の温度である 50℃に設定した。実験で得られた冷却曲線から熱伝達係数を算出し、異なる冷却条件における冷却特性の比較を行なった。熱伝達係数は図 2(c)に示すように測温位置に対してエリアを分割し、各エリア間の熱のやりとりを考慮して各エリアでの熱伝達係数を式 (1) から算出した。ここで、 m : 各エリアの質量、 C_p : 各エリアの比熱、 T : 各エリアの温度、 T_{bulk} : 各エリア近傍の溶液温度、 h : 各エリアの熱伝達係数、 A : 各エリアの表面積、 l : 中心から各測温点までの距離を示す。添え字 t : 上面、 s : 側面、 b : 底面、 c : 中心、 i : 熱伝達係数を算出する測定位置 ($i = t, s, b, c$ のいずれか) を示す。また、冷却状況の変化をビデオカメラにより観察するために、 $\phi 40\text{mm}$ の球体形状の試験体を用いた焼入れ実験も行った。

Fig. 2 Schematic of experiment equipment for test quenching. (a) Experiment equipment for test quenching. (b) Temperature measurement point. (c) Partition of area for calculation of heat transfer coefficient.

$$m_i C_{pi} \frac{dT_i}{dt} = h_i A_i (T_i - T_{\text{bulk},i}) - m_c C_{pc} \frac{dT_c}{dt} \left(\frac{\frac{(T_c - T_i)}{l_i}}{\frac{(T_c - T_i) A_t}{l_t} + \frac{(T_c - T_i) A_b}{l_b} + \frac{(T_c - T_i) A_s}{l_s}} \right) \quad (1)$$

2・3 ポリマー濃度が冷却特性に及ぼす影響

対象としたポリマー濃度は、操業での濃度推移を加味して、15vol.%, 25vol.%, 30vol.%, 35vol.%および水 (ポリマー濃度 0%) とした。円柱試験体の側面から 1.5mm 位置 (s 点) における温度の経時変化を図 3 に示す。試験体の冷却に伴って伝熱形態は膜沸騰から核沸騰へ移行する。ポリマー濃度が高い方がより低い温度まで膜沸騰状態を維持していることが確認された。次に、球体形状の試験体による観察結果 (0vol.%, 20vol.%, 25vol.%, 30vol.%) を図 5 に示す。水焼入れの場合、高温の試験体を投入すると球体周りに蒸気膜が生成し、膜沸騰状態となる。一方、ポリマー水溶液を用いた場合、この蒸気膜の外側に白いポリマー層が形成されることが観察の結果よりわかった。さらに、ポリマー濃度が高くなるにつれて蒸気膜が長時間保持されることが確認された。これは、熱流束低下による蒸気膜の崩壊を析出したポリマーが抑制する効果を持つことを示していると考えられる。

円柱試験体の側面 (s 点) における熱伝達係数の算出結果を図 4 に示す。焼入れ初期の膜沸騰領域ではポリマー水溶液の濃度にかかわらず、熱伝達係数は $300 \text{ W/m}^2\text{K}$ とほぼ一定であり、核沸騰に移行すると熱伝達係数は

増加する。ポリマー濃度が 15vol.% の場合、熱伝達係数の最大値は約 $2700\text{W/m}^2\text{K}$ 、ポリマー濃度が 35vol.% の場合、熱伝達係数の最大値は約 $1800\text{W/m}^2\text{K}$ 程度であり、ポリマー濃度が高いほど核沸騰時の熱伝達係数の最大値は低くなる結果となった。また、水焼入れ (=ポリマー0%) の場合には、熱伝達係数は最大 $4500\text{W/m}^2\text{K}$ 程度になっており、ポリマーの添加により冷却能力は緩和されていることが確認できた。一方、 300°C 以下の領域ではポリマー濃度に関わらず熱伝達係数が同程度であることも明らかとなった。これらの結果は、過去の研究 (三木田, 中林, 1986, 鳴海, 1999) で示された知見とも一致している。ポリマー濃度が冷却特性に及ぼす影響は、核沸騰への移行時間および核沸騰開始から 300°C 付近までの緩冷却特性であり、従来の知見で示されているようにポリマー濃度に伴って緩冷却特性は向上することが確認された。

Fig.3 Temperature history at s-point in polymer quenching

Fig.4 Heat transfer at s-point in polymer quenching

Fig.5 Cooling behavior in polymer quenching

3. ポリマー濃度と焼入れに伴う発生応力の関係

3・1 焼入れ応力解析

ポリマー水溶液の冷却特性と焼入れに伴う発生応力の関係を調査するため、焼入れ応力解析を行った。焼入れ応力解析では、冷却過程における温度、相変態および応力・歪の連成解析を行う。対象材とする低合金鋼の化学成分を表 1 に示す。解析に使用した応力-歪曲線は、対象とする鋼種にて引張試験を行い得られた結果を使用した。熱伝導率、比熱などの熱物性に関しても実測値を使用した。変態中の塑性変形に影響を及ぼす変態塑性係数は、

ベイナイト変態では $1.30\text{E-}04 \text{ MPa}^{-1}$ ，マルテンサイト変態では $5.00\text{E-}05 \text{ MPa}^{-1}$ とした．冷却中の変態開始温度および変態分率の推定に使用する TTT 線図は，対象とする材料に近い成分のデータを修正して使用した．なお，図 6 に示すように解析での変態開始温度および変態分率がフォーマスタ試験で実測した温度と歪の関係と一致することを確認している．解析モデルは実際に焼割れが発生したことがあるフランジ付き丸棒形状とした．解析モデルを図 7 に示す．計算時間の短縮を図るため軸対称モデルとした． 900°C に加熱したフランジ付き丸棒を各ポリマー水溶液（15vol.%, 25vol.%, 30vol.%, 35vol.%）で焼入れする解析を行った．解析に使用する熱伝達係数は，前章で採取した円柱試験体の側面（s 点）における熱伝達係数を使用した．数値シミュレーションソフトには，汎用有限要素解析ソフト FORGE（TRANSVALOR 製）を使用した．

Table 1 Chemical composition of test steel material (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Mo
0.40	0.25	1.00	2.00	0.25

Fig.6 Elongation vs. Temperature (actual and simulated)

Fig.7 Analytical model of work piece

3・2 ポリマー濃度と焼入れに伴う発生応力の関係

焼割れの発生事例があるフランジ平面部における半径方向応力の経時変化を図 8 に示す．なお，図 8 にはフランジ平面部において過渡応力が最大となった位置での値を示している．焼入れ開始直後に熱収縮に起因する引張応力が発生し，その後，マルテンサイト変態による体積膨張によって圧縮応力が発生している．最終的に，表面側に引張応力が作用することになるが，これは，マルテンサイト変態の体積膨張よりも冷却に伴う体積収縮による引張応力が優位になること，および，内部が遅れて変態することに起因していると考えられる．

実際の割れ事例と半径方向の応力コンター図（25vol.%，3600s のとき）の比較結果を図 9 に示す．焼割れ発生位置と応力発生位置が良く一致しており，焼入れに伴う発生応力が焼割れに大きく寄与していることが示唆される．過渡応力の最大値はポリマー濃度 25% のものが最も小さく，ポリマー濃度 30%, 35%, 15% の順に過渡応力の最大値が大きくなった．これらの過渡応力の違いには， $300^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ の温度域や $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ の温度域での熱伝達係数の違いが影響を及ぼしていると考えられる．しかしながら，過渡応力の最大値の差異は 50MPa 程度と小さく，調査したポリマー濃度の範囲内では，ポリマー濃度の違いが焼割れ発生に及ぼす影響は小さいと考えられる．

Fig.8 Transient quenching stress history obtained from FE analysis in flanged part. Regardless of the polymer concentration, maximum radial stresses are almost the same.

Fig.9 Comparison of actual quenching crack and radial stress contour map. (a) Photograph of actual quenching crack in flanged part. (b) Photograph of cross section actual quenching crack in flanged part and radial stress contour map in flanged part. (c) Radial stress contour map of flanged shaft surface.

3・3 操業ポリマー水溶液での焼入れに伴う発生応力

次に、濃度の影響を確認する目的で、操業ポリマー水溶液での焼入れに伴う発生応力について解析した。操業ポリマー水溶液とは、実機の焼入れ槽から採取した実際の操業に使用したポリマー水溶液のことである。ポリマー水溶液を採取した後、屈折率計にて濃度を測定した。ポリマー濃度が30%および35%の操業ポリマー水溶液を対象とし、2・2節と同様の手法で熱伝達係数を採取した。また、操業ポリマー水溶液と区別するため、2・3節で調査した未使用のポリマー水溶液をポリマー新液と呼ぶこととする。

操業ポリマー水溶液とポリマー新液でのフランジ平面部における半径方向応力の経時変化を図10に示す。操業ポリマー水溶液での焼入れに伴う発生応力が、ポリマー新液での発生応力よりも大きくなっていることがわかる。同じ濃度のポリマー新液に対してだけでなく、濃度の異なるポリマー新液に対しても過渡応力の最大値は大きい。操業ポリマー水溶液とポリマー新液での発生応力の差異は200MPa以上あり、ポリマー新液におけるポリマー濃度が変化した場合の発生応力の差異と比べて4倍以上と非常に大きい結果となった。操業ポリマー水溶液においては、ポリマー新液で得られた濃度との関連性をそのまま適用できず、焼入れに伴う発生応力に与える濃度以外の要因についても検討する必要がある。

Fig.10 Transient stress history including used polymer solution. Radial stresses quenching used polymer solution are higher than radial stresses quenching fresh polymer solution. The difference of maximum radial stress value between quenching used polymer solution and quenching fresh polymer solution is 4times higher than the difference of maximum radial stress value fresh polymer quenching with polymer concentration.

4. 焼割れ発生に影響を及ぼすポリマー水溶液の劣化

4・1 操業ポリマー水溶液の冷却特性

濃度以外の要因を調査するため、操業ポリマー水溶液およびそれと同じ濃度のポリマー新液での熱伝達係数の比較を行った。その結果を図 11 に示す。熱伝達係数は、焼入れ初期から 350℃付近までは、ほぼ同じ値を示している。一方で、350℃以下の温度域における熱伝達係数が大きく異なっており、新液と比較して熱伝達係数が最大で 2 倍になる部分も観察された。また、図 5 の結果との比較より、濃度の低いポリマー新液よりも緩冷却特性が低下していた。これまで、ポリマー濃度が一定値以上になるように濃度管理を行っていればポリマー焼入れにおける緩冷却特性を保持することができ、焼割れ防止にも有効であると考えていたが、焼入れ使用を繰り返したポリマー水溶液ではポリマー新液で得られた濃度と緩冷却特性の関連性がそのまま適用できないことが明らかになった。ポリマー水溶液の劣化に伴うこの 350℃以下の温度域における緩冷却特性の低下が、焼割れに影響を及ぼす要因の一つであると考えられる。

Fig.11 Comparison between fresh and used polymer solutions on heat transfer coefficient with respect to side surface temperature in polymer quenching. Heat transfer coefficient greatly changed at 350 degree below.

4・2 操業ポリマー水溶液の分子量分布

操業ポリマー水溶液における 350℃以下の温度域における緩冷却特性の低下の原因として、ポリマー水溶液の繰り返し使用によるポリマーの熱分解が考えられる。そこで、ポリマー熱分解の状態を調査するため、ポリマー新液および操業ポリマー水溶液（ポリマー劣化液）のポリマーの分子量分布を調査した。対象としたポリマー水溶液は、25%濃度のポリマー新液と、35%濃度のポリマー劣化液とした。ポリマー新液とポリマー劣化液に対して GPC 法により得られた積分分子量分布曲線を図 12 に示す。横軸が $\log M$ (M は分子量) で、縦軸が単位 $\log M$ 当たりの質量分率 $dw/d(\log M)$ を示す(JIS K0214 412,2013)。ポリマー新液では分子量が 20,000 付近でピーク値を示す。一方で、ポリマー劣化液では 20,000 付近でピーク値を示すものの、ポリマー新液に比べそのピーク値は低くなっている。それに加えて、ポリマー劣化液では 10,000 以下の分子量を持つポリマーが増加していることが明らかになった。これらのことから、ポリマー水溶液の冷却特性には、ポリマー濃度以外にポリマーの分子量が関係し、低分子量化したポリマーが緩冷却特性を低下させるものと推察できる。

Fig.12 Molecular weight of polymer solution. Used polymer solution contains lower molecular weight components than fresh polymer solution.

4・3 劣化模擬ポリマー水溶液の冷却特性および焼入れに伴う発生応力

低分子量化したポリマーが冷却特性に及ぼす影響を調査するため、平均分子量の異なるポリマーが混在するポリマー水溶液（以後、劣化模擬ポリマー水溶液と称す）を作成した。劣化模擬ポリマー水溶液の作成には、PAGと類似の構造をもつポリエチレングリコール（PEG）を用いた。操業ポリマーの分子量分布を加味して平均分子量が 2,000 の PEG を使用した。劣化模擬ポリマーの調合状態を図 13 に示す。比較対象として 25vol. %のポリマー新液（図 12(a)）を基準とし、平均分子量が 2000 の PEG を添加したものを劣化疑似ポリマー水溶液(図 12(b))として新たに準備した。

熱伝達係数の測定結果を図 14 に示す。劣化模擬ポリマー水溶液の 300℃以下の温度域における緩冷却特性の低下が大きく、操業液の冷却特性において観察された現象が再現できていることがわかる。また、同じ質量のポリマー新液が存在しているにもかかわらず、低分子量ポリマーが混在することにより緩冷却能が低下することを示している。次に、劣化模擬ポリマー水溶液での焼入れを想定した焼入れ応力解析結果を図 15 に示す。劣化模擬ポリマー水溶液での焼入れに伴う発生応力がポリマー新液に対して大きくなっていることがわかる。これらの結果より、ポリマー水溶液の劣化に伴う 300℃以下の温度域における緩冷却特性の低下が、焼入れ中の発生応力に大きな影響を及ぼしているといえる。つまり、焼入れに影響を及ぼすポリマー水溶液の劣化は、ポリマー水溶液におけるポリマーの低分子量化が一つの原因であることがわかった。

Fig.13 Preparation method of polymer solution

Fig.14 Heat transfer coefficient with respect to side surface temperature in polymer quenching.

Deterioration-simulated polymer solution has the same cooling characteristics as actual deteriorated polymer solution. It shows deterioration of polymer solution is due to the lowering of the molecular weight.

Fig.15 Transient stress history in flanged part including deterioration-simulated polymer solution. Radial stress quenching deterioration-simulated polymer solution is higher than radial stress quenching fresh polymer solution, it shows the lowering of the molecular weight is one of the causes of quenching cracks generation in polymer quenching.

5. 結 言

焼割れを発生させない安定した大型鍛鋼品のポリマー焼入れプロセスの確立を目指して、焼割れ発生に影響を及ぼすポリマー水溶液の劣化について調査し、以下の結論を得た。

- ・ポリマー新液では、ポリマー濃度が高くなるに伴ってポリマー水溶液の緩冷却特性が向上する。本結果は、過去の研究で報告されていた結果と同様であった。
- ・操業ポリマー水溶液では、同じポリマー濃度のポリマー新液に対して緩冷却特性が低下するだけでなく、濃度の低いポリマー新液よりも緩冷却特性が低下していた。特に、350℃以下の温度域における熱伝達係数が大きく異なっており、ポリマー新液と比較して熱伝達係数が最大で2倍になる部分も観察された。
- ・焼入れ応力解析より、操業ポリマー水溶液の焼入れに伴う発生応力の最大値が、同じ濃度のポリマー新液に対してだけでなく、濃度が低いポリマー新液に対しても大きくなっていることがわかった。ポリマー新液ではポリマー濃度によって焼入れに伴う発生応力に大きな差異は見られなかったことから、操業ポリマー水溶液においては、ポリマー新液で得られた濃度との関連性をそのまま適用できず、焼入れに伴う発生応力に与える濃度以外の要因を考慮する必要がある。

- ・劣化模擬ポリマー液による焼入れ実験の結果、ポリマー新液に低分子量ポリマーが混在することにより、緩冷却能が低下することが確認された。特に、300℃以下の温度域における緩冷却特性の低下が大きく、操業液の冷却特性で観察された現象が再現できていることがわかった。
- ・焼割れに影響を及ぼすポリマー水溶液の劣化は、ポリマー水溶液におけるポリマーの低分子量化が一つの原因であることがわかった。

文 献

- 有本享三, 鋼の焼割れとシミュレーションによるその予測, Sanyo Technical Report Vol.20, No.1(2013), pp.11-23.
- Eshraghi,K.M, Golozar,M.A. and Kurmanpur, A., Application of polymeric quenchant in heat treatment of crack-sensitive steel mechanical parts: Modeling and experiments, Material & Design, Vol.32, Issue5(2011), pp.2870-2877.
- 福谷理明, 寺崎俊夫, 今村博行, 藤田敦, 円柱焼入れ中の過渡応力と焼割れ発生の関係, 日本船舶海洋工学会論文集 No.6(2007), pp.119-129.
- 井上達雄, 有本享三, 変態-熱-力学に基づいた熱処理シミュレーション用 CAE システム'HEARTS'の開発と応用, 材料, Vol.44, No.496(1995), pp.103-109.
- 石山治, 松本修, 高橋功, 藤田寿夫, 大形鍛鋼品へのポリマー焼入れの適用, 神鋼 R&D, Vol.60, No.2(2010), pp.20-23.
- 笠井秀明, 水溶性焼入れ液の技術動向, 熱処理, Vol.46, No.6(2006), pp.339-345.
- Koudil,Z., Ikkene,R. and Mouzali, M., Cooling capacity optimization: Calculation of hardening power of aqueous solution based on poly(N-Vinl-2-Pyrrolidone), Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.23, Issue2(2014), pp.551-559.
- 三木田嘉男, 中林一朗, 高炭素クロム鋼軸受鋼の焼割れに関する研究(焼割れに及ぼすオーステナイト化温度およびポリマー液特性の影響), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.53, No.489(1986), pp.884-889.
- 三木田嘉男, 中林一朗, 高炭素クロム鋼軸受鋼の焼割れに関する研究(焼割れに関するポリマー焼入れ液の曇点の影響), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.53, No.496(1987a), pp.2211-2215.
- 三木田嘉男, 中林一朗, 高炭素クロム鋼軸受鋼の焼割れに関する研究(焼入れの繰り返しによる焼割れ感受性の判定について), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.54, No.502(1987b), pp.2246-2250.
- 鳴海孝雄, ポリマークエンCHANT (水溶性焼入れ液) の管理, 潤滑経済(1999), pp.14-19.
- 寺崎俊夫, 川上博己, 長谷川弘毅, 福谷理明, 機械的性質の温度依存性を考慮した相変態応力解析方法, 溶接構造シンポジウム講演論文集(2006), pp.585-592.
- 内田富士夫, 堀江皓, 平塚貞人, 進藤亮悦, 加藤勝, 低合金鋳鋼材の焼割れに及ぼす冷却媒体の影響, 鑄造工学, Vol.80, No.2(2008), pp.100-106.
- 内田均, 中村英一, 水溶性焼入れ剤の冷却特性回復方法及び冷却特性が回復した水溶性焼入れ剤, 特許第 3824695 号 (2006).
- 柳沢祐介, 小枝日出夫, 菊池久里馬, 佐々木克彦, 相変態及び変態塑性を考慮した大型軸材の熱処理残留応力解析, 材料学会講演論文集(2014).
- 横井豊, 佐藤公俊, 熊田雅弥, 逆溶解液による沸騰の抑制, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.62, No.593(1996), pp.256-262.

References

- Arimoto, K., Quench cracking in steel and its prediction using simulation, Sanyo Technical Report Vol.20, No.1(2013), pp.11-23(in Japanese).
- Eshraghi,K.M, Golozar,M.A. and Kurmanpur, A., Application of polymeric quenchant in heat treatment of crack-sensitive steel mechanical parts: Modeling and experiments, Material & Design, Vol.32, Issue5(2011), pp.2870-2877.
- Fukuya, M., Teraski, T., Imamura, H. and Fujita, A., Relation between transient stress and quenching cracks in cylinders

- generated by quenching, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.6(2007), pp.119-129(in Japanese).
- Inoue, T. and Arimoto, K., Development and implementation of CAE system “HEARTS” for heat treatment simulation based on metallo-thermo-mechanics, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.44, No.496(1995), pp.103-109 (in Japanese).
- Ishiyama, O., Matsumoto, O., Takahashi, I. and Fujita, T., Application of polymer quenching of large forgings, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, Vol. 60, No. 2(2010), pp.20-23(in Japanese).
- Kasai, H., Technical trend of the water soluble quenchants, Heat treatment, Vol.46, No.6 excerpts (2006), pp.339-345 (in Japanese).
- Koudil,Z., Ikkene,R. and Mouzali, M., Cooling capacity optimization: Calculation of hardening power of aqueous solution based on poly(N-Vinl-2-Pyrrolidone), Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.23, Issue2(2014), pp.551-559.
- Mikita, T. and Nakabayashi, I., Study of quench cracking of a high carbon and chromium steel bar(1st Report, Effect of austenitizing temperature and properties of polymer quenchant on quenching cracking), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.53, No.489(1986) , pp.884-889 (in Japanese).
- Mikita, T. and Nakabayashi, I., Study of quench cracking of a high carbon and chromium steel bar(3rd Report, Effect of clouding point of polymer quenchant on quenching cracking), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.53, No.496(1987a) , pp.2211-2215 (in Japanese).
- Mikita, T. and Nakabayashi, I., Study of quench cracking of a high carbon and chromium steel bar(4th Report, Repeated quenching), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.54, No.502(1987b), pp.1246-1250 (in Japanese).
- Narumi, T., Polymer quenchant(suiyousei yakiireeki)no kanri, Journal of economic maintenance tribology(1999), pp.14-19(in Japanese).
- Teraski, T., Kawakami, H., Hasegawa, K. and Fukuya, M., Numerical analysis method for stress caused by phase transformation taking into account of the temperature dependency of mechanical properties, Proceeding of the National Symposium on Welding Mechanics & Design (2006), pp.585-592(in Japanese).
- Uchida, F., Horie, H., Hiratsuka, S., Shindo, R. and Kato, M., Effect of cooling medium on quenching crack in low alloy cast steel, Journal of Japan Foundry Society, Vol.80, No.2(2008), pp.100-106(in Japanese).
- Uchida, H. and Nakamura, E., Suiyousei yakiirezai no reikyaku tokusei kaifukuhouhou oyobi reikyaku tokusei ga kaifukusita suiyousei yakiirezai, Japanese patent No.3834695(2006)(in Japanese).
- Yanagisawa, Y., Koeda, H., Kikuchi, K. and Sasaki, K., Residual stress analysis considering phase transformation and transformation plasticity for heat-treated large shaft, Proceedings of the 63rd JSMS Annual Meetings(2014)(in Japanese).
- Yokoi, Y., Sato, K. and Kumada, M., Control of boiling utilizing inversely soluble solution, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.62, No.593(1996), pp.256-262 (in Japanese).