

## 解説



## Review

# Experiences with New Modular Vacuum Heat Treatment Systems in the Automotive Industry

Klaus Loeser <sup>\*1</sup> and Karl Ritter <sup>\*2</sup>

## Synopsis

*Gear wheels and gear shafts are components which are subjected to the highest dynamic stresses in power train engineering. In order to obtain the specified strength properties on the gear flank and the gear tooth root, these parts must be heat treated. Currently, heat treatment is mostly performed by casehardening in atmospheric gas carburizing furnaces using oil quenching. The increasing performance and quality requirements for gear parts also call for an improved quality of the heat treatment process. Therefore, new casehardening technologies such as vacuum carburizing combined with high pressure gas quenching were developed in the recent years. There is a great interest in this type of new heat treatment technology and the relevant furnace systems, especially as far as the heat treatment of highly stressed gear parts is concerned <sup>1)</sup>. These days, comprehensive production experiences with flexible, modular vacuum furnace systems are available especially in the field of serial production of power train components. The following article describes the present state of this heat treatment technology and informs about the experiences in large batch gear part production.*

## 1. Vacuum carburizing

### 1.1 Vacuum carburizing process

Contrary to atmospheric gas carburizing, the transmission industry mainly uses the process gases propane or acetylene and a process pressure of less than 2 kPa abs. for vacuum carburizing processes. These gases show high dissociation rates in the relevant temperature range of 900 – 980 °C and are perfectly suited for vacuum carburizing. Furthermore, densely packed loads with large surfaces can be carburized with acetylene, thus improving productivity. Contrary to atmospheric carburizing, vacuum carburizing uses oxidation-free hydrocarbons thus preventing intergranular oxidation in the part. Vacuum carburizing is distinguished by a very high carbon transfer which clearly reduces the process time as compared to atmospheric gas carburizing. A typical vacuum carburizing process (Fig.1) starts by heating up the parts under vacuum or convection to carburizing temperature. Convective heating with nitrogen at atmospheric pressure guarantees a rapid and uniform heating of the parts. This is beneficial to the distortion behavior of parts with complicated shapes and dimensions. After the load is completely heated, the actual carburizing process takes place in the pressure range of 0.2 to 2 kPa by adding the mentioned carburizing gases. After only a very short treatment time, the part's outer surface layer carburizes to the point of carbon saturation due to the high carbon transfer. In order to prevent carbide formation, the carburizing gas supply is stopped, followed by a short diffusion step while the carbon diffuses through the concentration gradient into the part. This leads to a decrease of the surface carbon content. Through so-called pulsing, i.e. multiple repetitions of carburizing and diffusion steps, a certain carbon profile is obtained. The carburizing phase is followed by a diffusion phase. The duration of the diffusion phase depends on the required carburizing depth and the required surface carbon content. Due to the fact that the carburizing process begins after temperature equalization to carburizing temperature, the carburizing results are particularly uniform and reproducible. The carburizing parameters, i.e. variable pulse times and pause times, as well as the necessary carburizing gas flow are calculated and established as recipe parameters by means of a simulation software. Before the actual gas quench process begins and upon completion of the diffusion phase, the parts are cooled down from diffusion temperature to a lower hardening temperature, thus reducing distortion, followed by high pressure gas quenching.

November 5, 2007

\* 1 Dr., Eng., New Technology, Heat Treatment, ALD Vacuum Technologies GmbH

\* 2 Sales, Heat Treatment Furnaces, ALD Vacuum Technologies GmbH

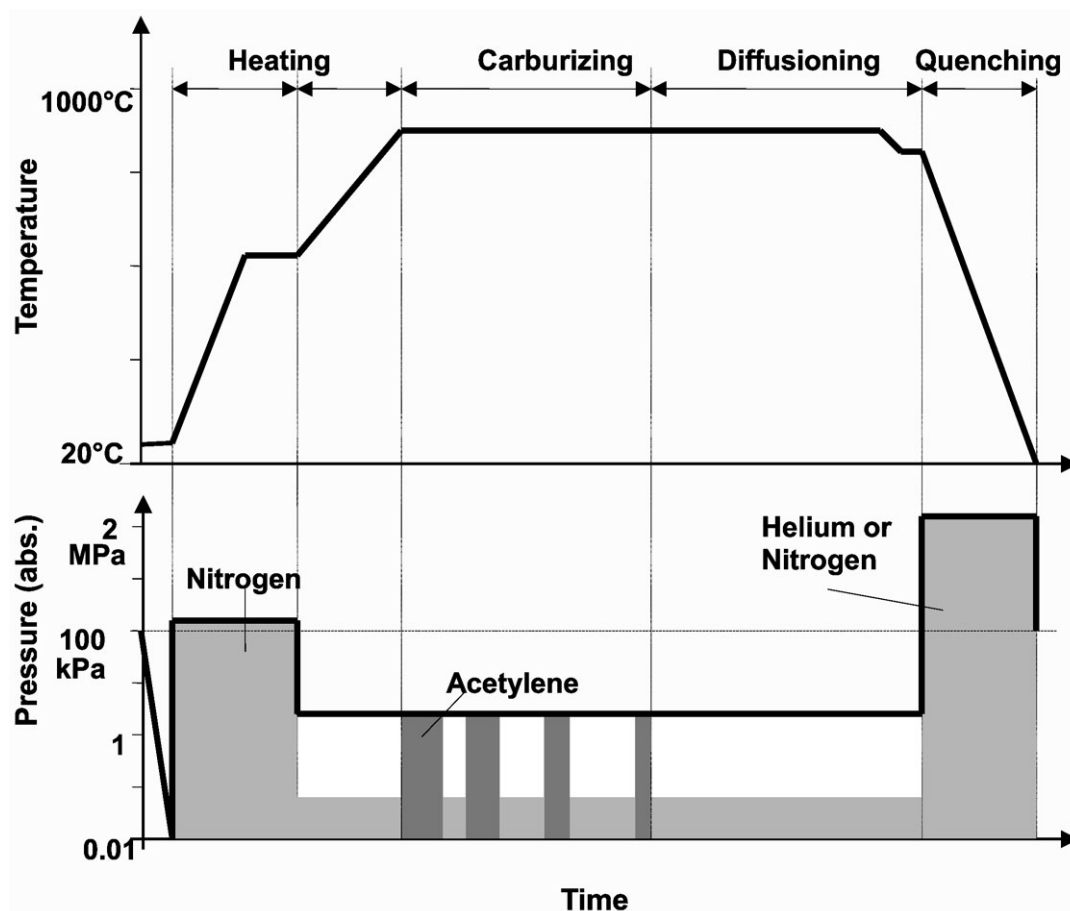


Fig.1. Schematic process flow of a vacuum carburizing and high pressure gas quenching process.

## 1.2 Vacuum carburizing in the automotive industry

With vacuum carburizing it is not possible to establish a carbon potential as it is done in atmospheric gas carburizing by using oxygen sensors, for example. However, this is not necessarily required for the carburizing of serial parts in the transmission industry. Instead of controlling the atmosphere, vacuum carburizing is a recipe-operated process. At the beginning of the serial run, the recipe is generated once by means of the above mentioned simulation software, establishing the process parameters. Vacuum carburizing is a very stable and reproducible process. Therefore, in serial production only the process parameters, i.e. carburizing temperature, pulse/pause times, carburizing gas flow and process pressure are controlled and monitored. Additionally, carburizing samples may be used in serial production for additional testing of the carburizing results. By simply weighing these samples before and after the casehardening process a cost efficient and prompt evaluation of the carburizing results is possible.

Through higher carburizing temperatures an additional increase in productivity is reached. However the temperature in most of the atmospheric gas carburizing plants can not exceed 1000 °C. Vacuum carburizing plants on the other hand are perfectly suited for this temperature range because of the used furnace material and the carburizing process. Actually, the maximum carburizing temperature is limited by the case hardening steel qualities, currently used in transmission technology, which are susceptible to grain coarsening at too high temperatures. New process technologies in steel manufacturing however allow the precise use of micro-alloying additions such as Al, Ti and Nb to produce fine grain-resistant steel qualities<sup>2)</sup>.

## 2. Gas quenching

### 2.1 Gas quenching process

For many years, high pressure gas quenching has been the preferred quench process in the heat treatment of tool steels. Through the steady increase of quench pressure and gas velocity as well as the development of suitable quench chambers, the quench intensity was increased in such a way that even low alloyed case hardening steels and heat treatable steels could be hardened successfully. “Dry” gas quenching compared to liquid quenching has ecological and economical advantages. The quench gases used such as nitrogen and helium are inert and leave no residue on the parts. It is not necessary to invest in washing machines or fire prevention systems. The use of gas recovery systems minimizes the gas consumption which in turn reduces heat treatment costs. The most important benefit of gas quenching compared to liquid quenching is the absence of phase transitions. These phase transitions cause heat transfers which vary strongly in time and location, leading to great temperature gradients within the parts which are, among other things, responsible for distortion in quenching. There are no phase transitions in gas quenching. The heat transfer is more homogeneous which is a precondition to minimize deformation in shape and size during quenching <sup>3)</sup>.

### 2.2 High pressure gas quenching in the automotive industry

The combination of vacuum carburizing and high pressure gas quenching processes in suitable furnace systems in the middle of the 1990's led to an increased significance of this heat treatment technology in heat treating small and medium-sized gear parts in the automobile industry. In low alloyed case hardening steels, however, it became necessary to limit the used materials in view of their hardenability scatter band towards higher hardenability, i.e. the use of so-called HH-qualities to obtain the required values of the tooth root core hardness <sup>4)</sup>. Fig.2 shows Jominy curves of various typical European casehardening steels from the EN 10084. When full loads of automobile gear wheels, as shown in the picture on the right, are quenched in gas, quenching intensities as indicated by the chain dotted line in Fig.2 can be obtained by means of high pressure gas quenching. Especially in low alloyed steels such as 16MnCr5; 20MoCr4 and 20NiCrMo2 a tooth root core hardness of more than 300 HV can only be obtained by using 2 MPa helium. Higher alloyed steels such as 20MnCr5 and 18CrNiMo7-6 can be hardened in gas with nitrogen. The better hardenability of the latter materials allow to successfully quench bigger commercial vehicle transmission parts in gas (Fig.3).

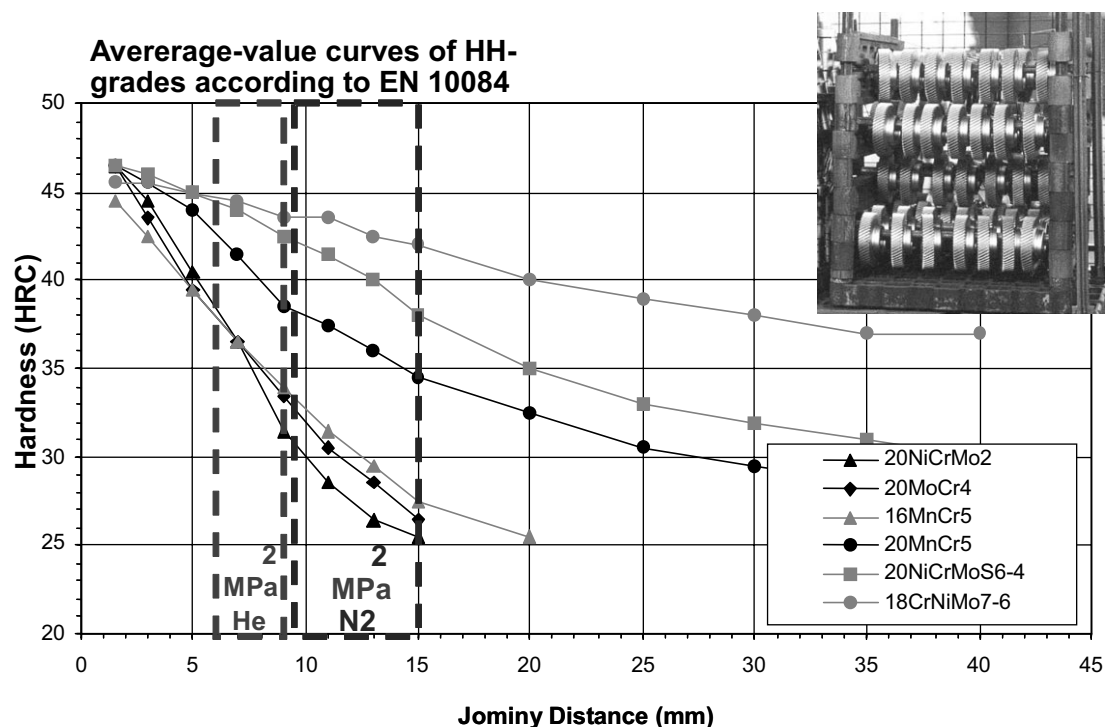


Fig.2. Influence of quenching gas on the tooth root core hardness of gears with respect to the hardenability of the material.



Fig.3. Large crown wheels of commercial vehicles(Dana).

Due to the limitation of the maximum quench intensity as compared to oil quenching, the new heat treatment technology is preferred in the production of new transmissions, where it is possible to adapt respectively change the used materials for better hardenable steels. The spread of the new casehardening technology has caused the steel manufacturers to develop modified resp. new steel qualities. New materials were developed especially for gas quenching. Here, the critical quenching intensity could be reduced by the use of alloy additions to enhance hardenability, such as Cr, Mn, Ni and Mo, in order to safely harden even larger parts using nitrogen and a quench pressure of 0.6 MPa.

As previously mentioned, changes in dimensions and shapes respectively their scattering can be reduced by gas quenching resulting in a reduction or even elimination of costs in the hard machining of gear parts, thus leading to a significant reduction of the total production costs. In the recent years, many examinations were performed in order to exploit the full potential, leading to the development of new gas quench processes. Thus, ring gears in 6-speed automatic transmission, which are highly susceptible to

distortion, are treated on special charging fixtures made of carbon-fiber reinforced carbon and quenched in a free gasflow in a step-by-step quench process called “Dynamic Quenching”. Subsequent hard machining has not been necessary <sup>5)</sup> (Fig.4).



Fig.4. Ring gears of 6-speed automatic transmissions loaded on CFC fixtures.

Another example for parts susceptible to distortion are pinions where significant run-out distortion is occurring after oil quenching. These parts are normally straightened in an additional process step which bears the risk of cracks resulting in scrap parts. A process comparison of atmospheric carburized and oil quenched pinions versus vacuum carburized and gas quenched pinions showed that absolute run-out values and scatter of run-out could be significantly reduced by changing from conventional to the new heat treatment technology, reducing aligning work and the risk of crack formation (Fig.5).

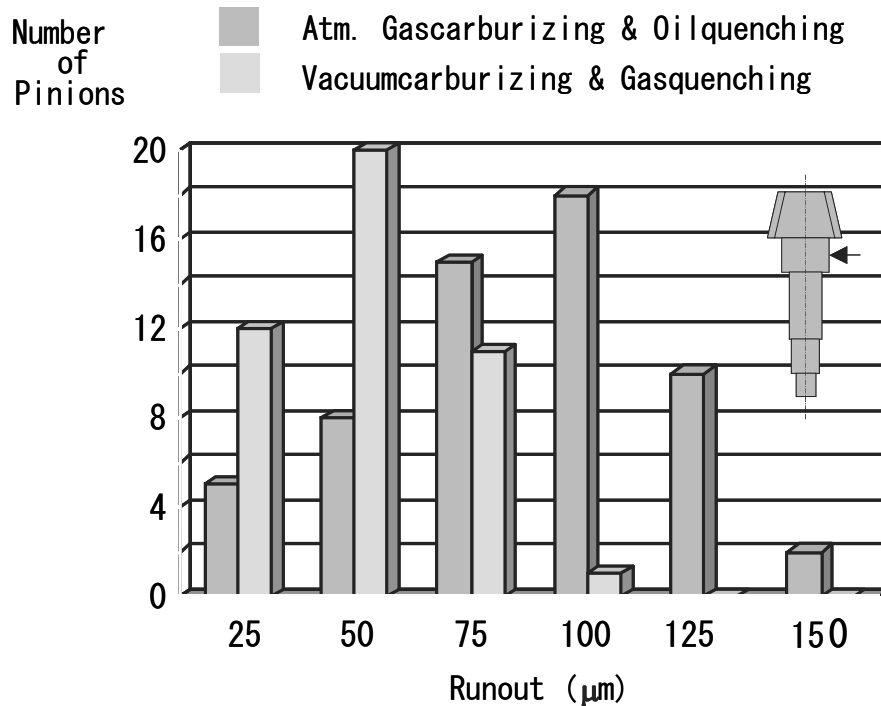


Fig.5. Reduction of run-out distortion of bevel gear pinions due to vacuum carburizing and gas quenching.

### 3. Flexible and modular heat treatment system ModulTherm®

In the middle of the 90's, sequential vacuum multi-chamber plants were built and delivered for large throughput (up to 1000 kg/h) in the automotive industry. These plants consist of up to 8 treatment chambers, arranged successively, connected by gas- and pressure-tight doors. An integrated transport system sequentially transports the charges through the plant. Although the design of these plants strongly resembles a conventional pusher furnace used in atmosphere technology, operational practice showed that their use requires a lot of maintenance. Very often the entire plant must be shut down in case of a breakdown of a single chamber. Therefore, modular and flexible furnace concepts were established in the market. While productivity is the same, these systems are easier to maintain and safer to operate <sup>6)</sup>.

Regarding production integrated heat treatment in the automotive industry, flexible and modular furnace technologies offering high throughput rates are required. A typical example for such kind of furnace technology is ModulTherm® <sup>7)</sup> (Fig.6). This system features up to 10 separate heat treatment chambers, arranged successively. The treatment chambers are supplied with loads up to 1000 kg by a transport module which runs on rails. The chambers are cold-wall furnaces, which means the chambers do not radiate heat and normally remain under vacuum and process temperature. They are offering extra large loading height up to 750 mm, especially for long shafts or multiple-layer loading. The chambers do not have to be heated or conditioned during idle times and are ready for operation shortly after being switched on.

A mobile transport module loads and unloads the treatment chambers. The transport module consists of a transport chamber equipped with a fork lift system. Furthermore it supports the high pressure gas quenching chamber where loads are quenched in a gas flow following the carburizing process. The transport module is supplied with the necessary consumables such as power, gas and cooling water via hoses, which are installed in an energy chain. For quenching, the quench chamber is positioned in front of the respective treatment chamber, the load is transported into the quenching chamber where the gas quench process takes place (Fig.7). Two powerful fans circulate the gas flow in the quench chamber. The gas flows homogeneously through the load via an internal gas guiding system. Subsequently, the heated gas is re-cooled in two heat exchangers which are installed above and below the load. It is possible to equip the chamber with an optional flow-reverse system, which reverses the gas direction through the load during quenching in a recipe-controlled process. This improves uniformity of the quench process further. The treatment chamber is ready for reloading while the load cools in the quench chamber. This increases the degree of utilization.





Fig.6. ModulTherm®-system for vacuum carburizing and gas quenching (Wegener Heartetchnik).

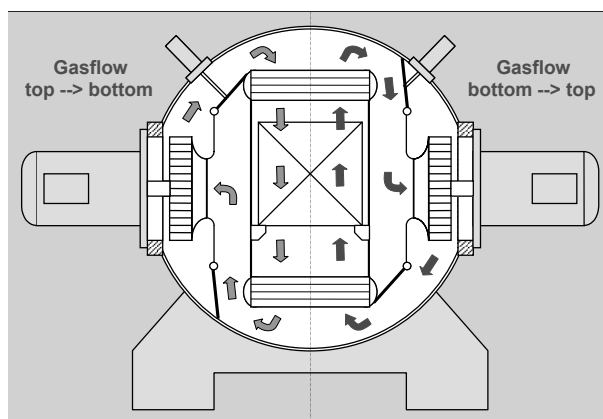


Fig.7. Highpressure gasquenching chamber with reversible gas flow technology.

## 4. Operation experiences with the ModulTherm®

### 4.1 Flexibility

Many positive long-term experiences have been reported regarding the use of the ModulTherm® system in the large batch production of transmission parts. The great flexibility of the system is already beneficial to the customer in the planning stage. At first, the plant may operate with a smaller number of treatment chambers if, for example, the number of gears to be produced or the ramp-up of production are uncertain. The chance to expand the plant by additional treatment chambers if needed reduces the investment risk and capital commitment. Such an expansion is performed with minimum operation interrupt and takes only a few days.

ModulTherm®'s high process flexibility is especially beneficial if different transmission parts are to be treated in one plant. For

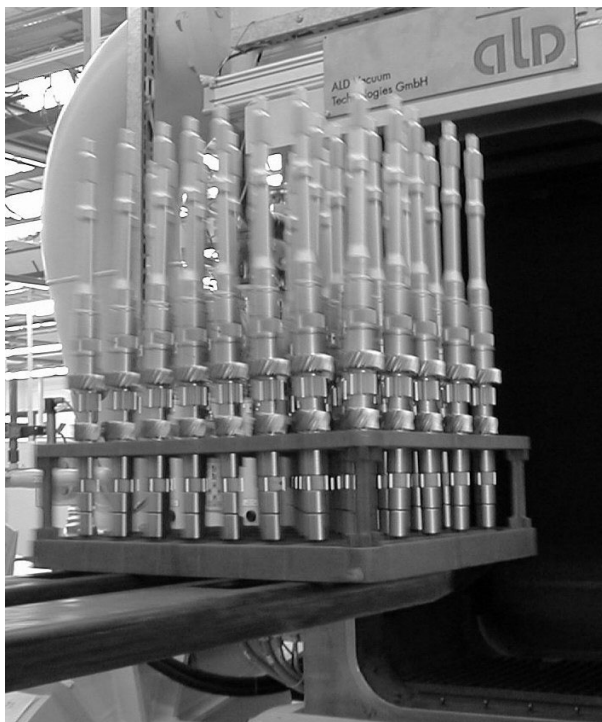


Fig.8. Long gear shafts (Getrag).

example, synchronizer parts with a shallow case of 0.3 mm, gear wheels with a medium case of 0.6 - 0.8 mm and gear shafts with a large case more than 1 mm can be treated in one plant with individual carburizing parameters which are optimally adapted. The quench process may also be adapted for the respective requirements. Thus the rather thin-walled synchronizer rings are quenched with a low quench pressure or by using “Dynamic Quenching”-technology, i.e. a step-by-step quench intensity which has very positive effects on distortion. The gear wheels are hardened with high gas pressure and velocity in order to obtain the required tooth root strength. If the parts are charged in several layers, reverse gas flow cooling technology with alternating flow from top to bottom and vice versa ensures uniform quenching and minimizes dispersion of the tooth root strength of parts within the load. Gear shafts, on the other hand, are quenched in either standing or hanging position and a gas flow from top to bottom. Gas pressure and gas velocity are adopted to reduce run-out distortion (Fig.8).

## 4.2 Process and machine capability

The process parameters required for serial production of transmission parts are determined in advance in a serial run. The optimal process parameters of each part are stored in heat treatment recipes. According to variations in the ingot material (melt, pre-heat treatment) the heat treatment results may show deviations although using the same recipe. Depending on the quality requirements it may be a good idea to do a pre-run on a new material charge in order to adjust the parameters for soft machining accordingly.

Heat treatment plants are more and more integrated into the mechanical production line. Therefore heat treatment must meet the demands of quality control in view of process capability<sup>8)</sup>. It is essential to consider the fact that the heat treatment result is influenced by numerous factors, which cannot be controlled by the actual heat treatment process itself. For example, inhomogeneities in the ingot material or complex residual stresses due soft machining of the gears may result in negative treatment results regarding microstructure and/or distortion. This can lead to low process-capability factors despite of a high quality heat treatment process. Another problem is the quality control of the heat treated parts which is very costly and time-consuming and the measuring methods are not as precise as the examination of geometrical dimensions following mechanical machining. Due to the above mentioned problems, many users do not apply process-capability studies to their heat treatment operations. Others extend the tolerance ranges of metallurgical and dimensional parameters to achieve the demanded process capability factors.

Contrary to the heat treatment of automotive parts in continuous pusher- or rotary hearth type furnaces, the heat treatment system ModulTherm® allows to monitor and document heat treatment parameters charge related. That means for each individual charge leaving the furnace a charge protocol is available documenting the complete heat treatment process of the charge i.g. pre-oxidizing, carburizing, quenching and tempering. This data is additionally stored in the PC and can be used for further analysis or statistics.

In addition to the standard process monitoring, i.e. plant condition and if necessary alarm signal, a charge-related process monitoring can be provided. By using the process monitoring, the maintenance of the important process parameters is confirmed in the charge protocol. Disturbances, relevant to the process, are documented in the charge protocol, listing the essential process parameters and identifying them as good/bad. If one of these process parameters deviate from the specification, it is identified as “bad” in the charge protocol. This information is automatically forwarded to the quality assurance system. There it has to be decided whether the load is accepted, further examination is required or if the load has to be rejected. The limit values of the process parameters may be defined part-related, i.e. depending on the recipe, as machine parameters.

### 4.3 Degree of technical availability and utilization

Due to economic reasons, a high level of technical availability and a high degree of utilization are essential for large batch production plants. This is especially required for heat treatment plants, which are directly integrated into the transmission production chain. In “just-in-time”-production, no buffers are planned for compensation in case of a furnace breakdown. Therefore modular plant system ModulTherm® offers a high degree of total utility of > 90 % and a technical availability of > 95 %. In case of a failure during the treatment process, the respective treatment chamber may be switched off from the production process without interfering with the remaining plant’s operation. In such a case, the throughput of a plant with 8 treatment chambers for example will be temporarily reduced by only 12.5 %, instead of by 100 % in case of pusher furnaces. For maintenance and repairs, the treatment chamber is cooled down and the actual heating chamber becomes accessible via a large rear door. Upon completion of the repair the chamber is closed, evacuated, heated and reintegrated into the complete production within a very short time. The design of the main components, such as transport module including gas quench chamber ensures that all drives are installed externally and are easily accessible. In case of maintenance or failure, the transport module is moved to a special maintenance position where maintenance or repairs can be performed within a short time and then be returned to the production line. Naturally, a high degree of utilization requires adequate preventive maintenance which can be easily performed on the treatment chamber via the described rear service chamber door. Due to sturdy treatment chamber constructions and optimized processes, long maintenance cycles and the reduction of maintenance costs are achieved.

### 4.4 Process flexibility

ModulTherm® allows to perform a number of various processes. The majority of the plants are used in the power train industry to caseharden transmission parts by vacuum or low pressure carburizing or carbonitriding.

In addition to forgings, powder-metallurgical (PM) materials are widely used for transmissions parts. However, treatment of these parts in atmospheric carburizing furnaces with oil quenching has a number of disadvantages. High porosity prevents the formation of the required carburizing profile. The large surface area of the PM-parts demands a great deal of the atmospheric control in the furnace, especially as far as chromium-alloyed PM-parts are concerned. Furthermore, the open-pored surface requires a great amount of cleaning after oil quenching. The advantages of vacuum carburizing and gas quenching can also be used here. PM-sprockets are casehardened in a ModulTherm® plant with 6 treatment chambers (Fig.9). At first, oil residues from the mechanical calibration process are removed from these parts. This is done in 3 treatment chambers where the parts are de-oiled in vacuum. Then, the parts are transferred by means of the first transport module into one of the 3 carburizing chambers where they are vacuum carburized. Subsequently, quenching is performed in a transport module with integrated gas quenching under helium up to 2 MPa.

As already mentioned, the new heat treatment technology is also applied in the casehardening of bevel gear pinions in axle drives. Fig.10 shows a fully automatic casehardening plant based on the ModulTherm® system with 8 treatment chambers. The pinions made of 16MnCr5 are carburized with acetylene in vacuum and quenched in 2 MPa helium. An external transport system connects the ModulTherm® plant with the preoxidation furnaces, a tempering furnace and a big load buffer station being able to run the line throughout the weekend without personnel. A master control systems takes over the fully automatic control and monitors the entire heat treatment process.

The examples mentioned show the advantages of flexible, modular heat treatment systems, which have proven themselves against continuous systems in the market. Today about 100 heat treatment systems with more than 600 treatment chambers for the serial production of gear components are operating in the power train industry worldwide. The market for this new heat treatment technology will continue to grow in the future especially in case of advanced gear box technologies like 6-speed automatic or dual clutch gearboxes.





Fig.9. Deoiling, vacuum carburizing and gas quenching of PM-sprockets (Stackpole Ltd).

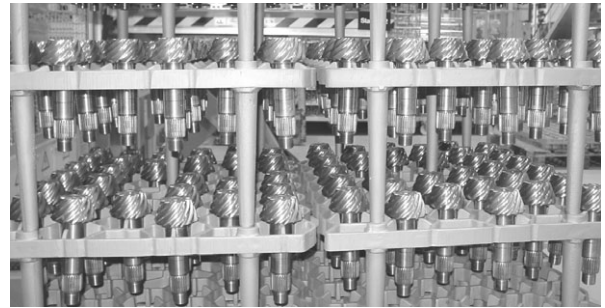


Fig.10. Fully automated 8-chamber ModulTherm® for vacuum carburizing and gas quenching of bevel gear pinions (BMW Group).

## 5. Summary

Vacuum carburizing in combination with high pressure gas quenching is an innovative heat treatment technology for highly stressed gear parts in the power train industry. It is distinguished by the following features:

- High carbon transition, i.e. short process times
- Parts, free of intergranular oxidation
- High carburizing uniformity and reproducibility
- Low process gas consumption
- Simple process control
- Low energy consumption
- Low distortion
- Bright, clean parts
- Selectable quench intensity
- Integratable into mechanical production line

Flexible and modular furnace systems like ModulTherm® have demonstrated to be well suited for the production-integrated heat treatment in the automotive industry.

## References

- 1) Loeser, K., G. Schmitt: Increase of productivity in the gear industry by vacuum carburizing and gas quenching. Heat Processing (2) Issue 3, 2004, p.141-144.
- 2) Trute, S., et. al.: Proceedings: Steels in Cars and Trucks 2005, S. 256-263, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, ISBN 3-514-00718-7.
- 3) Minarski, P., F. Preisser and W.R. Zenker: Quenching steel parts in 2 MPa Helium. Advanced Materials & Processes, April 2000, p. 23-26.

- 4) Loeser, K., R. Seemann: High pressure gas quenching and the influence of material hardenability of case hardening steels in the gear industry, ALD-Technical paper 2003.
- 5) Loeser, K., V. Heuer, D.R. Faron: Distortion Control by Innovative Heat Treating Technologies in the Automotive Industry. HTM 61 (2006) 6, p. 326-329.
- 6) Gupta, C., G. Willet, A. Volkmann: Flexible vacuum carburizing system, Industrial Heating, September 2003, p.87-90.
- 7) Ritter, K.: Successful launch of the flexible heat treatment system ModulTherm. Heat Processing (3) Issue 3, 2005, p.149-151.
- 8) Sommer, P.: Prozess-Sicherheit in der Wärmebehandlung im Spannungsfeld unterschiedlicher Blickwinkel. HTM 61 (2006) 6, S. 303-308.

## [参考訳]

# 自動車産業界におけるモジュール式 新真空熱処理システムの実績

クラウド レーザー, カール リッター

## 1. 真空浸炭

### 1. 1 真空浸炭プロセス

変速機業界は、ガス浸炭法ではなく、主にプロパンやアセチレンをプロセスガスとして使用し、2 kPa 未満の圧力で処理を行う真空浸炭法を採用している。これらのプロセスガスは、900 ~ 980 °C の設定温度で高い分解率を示し、真空浸炭には最適なものである。また、アセチレンを使用すれば、重積載された高表面積の処理品の浸炭も可能で生産性の向上につながる。ガス浸炭法と異なり、真空浸炭法は酸素を含まない炭化水素ガスを使用するため、部品の粒界酸化を防止することができる。真空浸炭法は高い炭素浸入性を有することを特徴とするが、これによりガス浸炭法と比べ処理時間の大幅な短縮が可能になる。代表的な真空浸炭処理パターンを Fig.1 に示す。まず真空中または対流雰囲気中で浸炭温度まで加熱する。大気圧下で窒素ガスを用いて行う対流加熱は、部品の迅速・均一な加熱が可能で、複雑形状部品のひずみを抑制するのに有効な手段である。処理品が加熱された後、0.2 ~ 2 kPa の減圧下で前述の浸炭ガスが添加され、浸炭工程が始まる。炭素浸入性が高いため、部品表面はごく短時間で炭素飽和点まで達する。炭化物の生成を抑制するため、浸炭ガスの供給を停止し短時間の拡散処理を行って、炭素を一定の濃度勾配で内部に拡散させる。この処理は表面炭素濃度低減の効果もある。浸炭処理と拡散処理を複数回繰り返すいわゆるパルス浸炭によって所定の炭素プロファイルが得られる。浸炭工程の後に拡散工程を行う。拡散時間は、要求される浸炭深さと表面炭素濃度によって決まる。浸炭工程は浸炭温度に達した後に行われるため、非常にばらつきが小さくかつ再現性の高い結果が得られやすい。浸炭パラメータ、すなわち各パルスの浸炭時間および拡散時間は、浸炭ガス必要流量と同様に、シミュレーションソフトによって計算され、レシピパラメータとして設定される。ひずみ抑制のため、拡散温度からいったん焼入れ温度まで徐冷された後に、高圧ガス焼入れが行われる。

### 1. 2 自動車産業界における真空浸炭

ガス浸炭において酸素センサーなどを使って行われている炭素ポテンシャル設定は、真空浸炭では不可能である。しかし、炭素ポテンシャル設定は、変速機業界の量産部品の浸炭には必ずしも必要ではない。真空浸炭は雰囲気制御型のプロセスではなく、レシピ主体のプロセスである。量産開始時に、一度だけ前述のシミュレーションソフトを使ってレシピを作成し、処理パラメータを設定する。真空浸炭は非常に安定した再現性高いプロセスである。したがって、量産においても、処理パラメータ（浸炭温度、各パルスの浸炭時間および拡散時間、浸炭ガス流量、処理圧力）の制御と監視のみを行う。また、量産においては、浸炭結果の確認のために浸炭サンプルを使うこともある。これらのサンプルの重量を浸炭工程前後に測定するだけで、浸炭結果の迅速、低コストな評価が可能である。

浸炭温度を上げることによって生産性をさらに向上させることができる。しかし 1000 °C 超の温度で浸炭を行うことができるガス浸炭炉はほとんどない。一方、真空浸炭炉は、その炉材や浸炭プロセスにより、この温度に十分に対応できる。最高浸炭温度は、変速機業界が現在使用している肌焼鋼の特性、つまり結晶粒粗大化特性により制限されるが、製鋼分野での Al, Ti, Nb など微量元素を活用した新技術によって、粗粒化防止鋼が開発されてきている<sup>2)</sup>。

## 2. ガス焼入れ

### 2. 1 ガス焼入れプロセス

長年、工具鋼の熱処理には高圧ガス焼入れが好ましいとされてきた。焼入圧力とガス流速の向上・安定化技術や適切な焼入チャンバーの開発により、焼入強度は向上し、低合金肌焼鋼をも焼入れ可能となった。「ドライな」

ガスによる焼入れは、液体による焼入れに比べ環境や経済面で優れている。窒素やヘリウムなどの焼入れガスは不活性ガスであり、部品に残留物を残すことはない。また、洗浄装置や火災防止装置への投資も不要となる。ガス回収装置の使用は、ガス消費量を最小限に抑え、熱処理コスト削減にもつながる。ガス焼入れの最も大きな利点は、液体焼入れで発生する冷却段階遷移が起きないということである。冷却段階遷移は、時間と部位によって大きな熱伝達変化 および 部品内での温度勾配をもたらし、焼入れ歪みの原因となる。焼入れによる形状・寸法変化を最小に抑えるためには、可能な限り均一な熱伝達を行うことが重要である<sup>3)</sup>。

## 2. 2 自動車産業界における高圧ガス焼入れ

1990 年台半ばに真空浸炭と高圧ガス焼入れの組合せに適した熱処理炉が開発されたことにより、自動車産業界における中小型ギア部品の熱処理において、真空浸炭と高圧ガス焼入れの組合せは重要性を高めた。しかし、低合金肌焼鋼では高い焼入性バンドが必要で、使用材料が限られた。つまり、必要な歯元硬さを得るためには、いわゆる高焼入性材を使用する必要があったのである<sup>4)</sup>。Fig.2 に、EN10084 の肌焼鋼代表鋼種のジョミニー曲線を示す。右の写真のようなフル積載された自動車用ギアが高圧ガス焼入れされる場合の歯元硬さは、破線で示される位置のものとなる。特に 16MnCr5, 20MoCr4, 20NiCrMo2 の低合金鋼では、300 HV を超える歯元硬さは 2 MPa のヘリウムでのみ得られ、高合金の 20MnCr5 や 18CrNiMo7-6 では窒素ガスでも得られる。高い焼入性の後者の材料を使用することにより、商用車の大きな変速機部品にもガス焼入れの適用が可能となる (Fig.3)。

油焼入れと異なり、焼入強度の制約があるため、真空浸炭 + 高圧ガス焼入れの新熱処理技術は、高焼入性材への変更が比較的容易な新型変速機の製造で採用されてきている。新技術の普及を受け、製鋼メーカーは特にガス焼入れ用として新しい鋼材を開発してきている。焼入強度の臨界値を、焼入性を高める Cr, Mn, Ni, Mo などの合金添加によって下げることができ、大きな部品をも 0.6 MPa の窒素ガスで焼入れすることが可能となってきている。

すでに述べたように、ガス焼入れは、寸法と形状の変化・ばらつきを小さくすることができ、さらにギア部品の機械加工費低減あるいは完全削減により、総製造コストの大幅削減を実現する。近年、ガス焼入れの潜在能力を最

大限に発揮するために、新しいガス焼入れ技術が開発されたのである。この結果、ひずみが発生しやすい 6 速自動変速機用リングギアは、炭素繊維強化カーボン製の特殊治具で、「ダイナミッククエンチ」と呼ばれるガス流中で段階的に焼入れが行われる方法で、焼入れが行われるようになった。なお、このプロセスの後に機械加工の必要はない<sup>5)</sup> (Fig.4)。

ひずみを生じさせやすい別の部品例としては、油焼入れでは顕著な軸振れが発生しやすいピニオンが挙げられる。ピニオンには矯正工程が付帯されているが、この工程で割れが発生し、屑化される危険性もある。真空浸炭 - ガス焼入れプロセスは、ガス浸炭 - 油焼入れプロセスよりも軸振れ絶対量とばらつきを顕著に低減し、矯正作業工数と割れ発生リスクを低減させる (Fig.5)。

## 3. フレキシブルなモジュール式熱処理システム ModulTherm®

1990 年代半ば、自動車産業界では大きな処理能力（最大 1000 kg/h）をもつ直列式多室炉が設置された。これは最大 8 つのチャンバーから構成され、ガス・圧力隔壁ドアを介して直列につながったものである。一貫搬送システムによってチャンバー間を搬送される。従来のガス浸炭炉のプッシャー炉に極めてよく似た設計となっているが、実際に操業してみると、かなりのメンテナンスが不可欠であることが明らかになった。たとえば、1 つのチャンバーの故障により、プラント全体を停止させなくてはならないという事態もしばしば起きた。その結果市場では、生産性同等、高メンテナンス性、かつ 高安全操作性を有する熱処理システムとして、モジュール式熱処理炉という概念が浮上した<sup>6)</sup>。

自動車産業界の熱処理システムとしては、生産性・フレキシビリティが高いモジュール式熱処理システムが必要である。このタイプの熱処理システムの代表例として、ModulTherm® が挙げられる<sup>7)</sup> (Fig.6)。このシステムは、直列に配置された最大 10 個の独立した浸炭モジュールを有することを特徴とする。浸炭モジュールには、レール上を走る搬送モジュールによって最大 1000 kg の処理品が供給される。浸炭モジュールは周囲に熱を放散しないコールドウォール構造で、通常、炉内は真空かつ浸炭温度に保持されている。長尺シャフトや多層積載など、最大 750 mm 高さまでの重積載が可能である。浸炭モジュールは休転中の保熱や雰囲気調整が不要で、電源を入れ



ば短時間で操業可能な状態になる。

浸炭モジュールへの処理品の供給と排出は、自走式の搬送モジュールを使って行われる。搬送モジュールには、フォークリフトが装備されていて、さらには、浸炭処理後に焼入処理を行う高圧ガス焼入チャンバーと一体化している。電力、ガス、冷却水などの必要なユーティリティーは、ケーブルベア内に敷設されたホースを介して搬送モジュールに供給される。ガス焼入れモジュールが各浸炭モジュールに連結され、処理品の移動とガス焼入れが行われる (Fig.7)。ガス焼入れモジュール内は2つの強力ファンでガス流を循環させている。ガス整流機構によって、ガスは均一に処理品に流れる仕組みとなっている。その後、熱くなったガスは、処理品の上下に設置された2つの熱交換器で冷却される。設定条件に基づいて、ガス焼入れ中にガス流を反転させる機構をオプション設置することも可能である。これによって焼入れの均一性をさらに高めることができる。ガス焼入れモジュールで処理中に、浸炭モジュールは次の処理品が受入れ可能な状態になるため、稼働率を上げることができる。

## 4. ModulTherm® の稼働実績

### 4. 1 フレキシビリティ

変速機部品の量産における ModulTherm® の長期稼働実績に関して、多くの肯定的な意見が報告されている。このシステムのフレキシビリティは、計画段階のユーザーにとっても有益なものである。たとえば、生産するギアの数や生産の立上げ時期が未定の場合、当初は少ない数の浸炭モジュールで稼働させることもできる。浸炭モジュールを必要に応じて増設・拡張することにより、投資リスクや投下資本を減らすことができる。このような拡張は、操業停止を最小限に抑えながら、わずか数日で行うことができる。

ModulTherm® のフレキシビリティは、1つの炉でさまざまな変速機部品を処理するような場合に、特に有用である。たとえば、硬化深さ 0.3 mm の浅浸炭を行うシンクロ部品、硬化深さが 0.6 ~ 0.8 mm と中程度の一般ギア、1 mm 超の深浸炭を行うギアシャフトを、それぞれに最適化された浸炭条件で、1つの炉を使って処理することが可能である。ガス焼入れ条件もそれぞれの要件に応じて調整することができる。たとえば、硬化深さが比較的浅いシンクロ部品は、低圧ガス焼入れすることも、あるいは「ダイナミックエンチ」すなわち、ひずみ低減

に非常に有効な焼入強烈度を段階的に変化させる方法で焼入れることもできる。一般ギアの場合は、歯元強度を確保するため、高いガス圧とガス流速で硬化させる。部品を数段に分けて積載するときは、ガスの流れを上から下、あるいは下から上に反転させるガス流反転冷却技術によって、均一な焼入れとロット内歯元硬さばらつきを最小限に抑えることができる。一方、ギアシャフトの場合は、立てかけた状態あるいは吊るした状態でガスを上から下に流して焼入れる。ガス圧とガス流速は、軸振れひずみを少なくするように調整される (Fig.8)。

### 4. 2 工程能力と設備能力

変速機部品の量産に必要な処理パラメータは、量産開始前に設定される。各部品の最適処理パラメータは、部品それぞれの熱処理レシピに保存される。同じレシピを使っても、溶解、前熱処理といった材料ロット違いで、熱処理結果は変わることがある。品質要求に応じて、別ロットの材料の処理を行う前にパラメータ調整のための予備試験を行った方がよい。

熱処理工程が機械加工ラインに組み込まれるケースがますます増えている。したがって、熱処理品質は、工程全体での工程能力を確保する品質管理要求を満たさなくてはならなくなってきている<sup>8)</sup>。熱処理の結果は、熱処理工程それ自体では管理しきれないさまざまな要因の影響を受けるという事実も考慮する必要がある。たとえば、材料のばらつきやギアの熱処理前の加工に伴う複雑な残留応力は、ミクロ組織やひずみにマイナスの結果をもたらすことがある。これは、熱処理段階の品質が高くて、工程全体としての工程能力を低下させることを意味する。もう一つの問題としては、非常に高コストで工数もかかる熱処理部品の品質管理という問題であり、測定方法が、その後にある機械加工での形状測定ほど測定精度が高くないことである。このような問題のため、工程能力の検討結果を熱処理操業に反映させないユーザーが多いが、冶金学的品質や形状品質の許容範囲を広げ、要求される工程能力を達成しているユーザーもいる。

プッシュャー炉や回転炉による自動車部品の熱処理とは異なり、ModulTherm® は、熱処理パラメータを監視し、熱処理チャージごとに記録することができる。つまり、炉に装入した各チャージごとにチャージプロトコルが設定され、すべての熱処理プロセス（予備酸化、浸炭、焼入れ、焼戻し）が記録されるのである。これらのデータはパソコンに保存し、更なる解析や統計処理に利用することができる。



標準プロセス監視機能（プロセスの状態を監視し、必要に応じて警報を出す機能）に加え、チャージごとの処理状況を監視する機能も追加することができる。この監視機能を使用すれば、チャージプロトコルで重要な処理パラメータを確認することができる。処理に関わるさまざまな障害は、チャージプロトコルに記録され、主要な処理パラメータはリストアップされ、その適不適の判定が行われる。規格に適合しない処理パラメータがあると、そのパラメータはチャージプロトコルで「不適合」と識別される。この情報は自動的に品質保証システムに送られ、その部品を合格とするか、追加検査を行う必要があるか、あるいは不合格にするか判断しなくてはならない。処理パラメータの判定基準は、設備パラメータのようにレシピによって、部品ごとに決定することができる。

#### 4. 3 設備的稼働可能率と実稼働率

高い設備的稼働可能率（設備的には稼働可能な時間を暦時間で除したもの）と高い実稼働率は、大ロット生産を行う工場には経済的観点から不可欠である。これは、熱処理工程が変速機生産ラインに直接組み込まれる場合には特に重要である。「ジャストインタイム」生産方式においては、炉の故障を補償するバッファはもともとない。モジュール式システムである ModulTherm® が、90 % 以上の高い実稼働率と 95 % 以上の設備的稼働可能率を提供するのはこのためである。処理中に不具合が発生した場合、当該浸炭モジュールは他の浸炭モジュールの運転を妨げることなく生産ラインから切り離すことができる。このような場合、プッシャー式連続炉を使用するシステムの処理能力は 100 % 低下するが、たとえば 8 個の浸炭モジュールをもつ ModulTherm® システムの場合は、その処理能力が一時的に 12.5 % 低下するに過ぎない。メンテナンスや修理を行う時は、当該浸炭モジュールのみが冷却され、作業者はモジュール後面の大きなドアから炉内に進入することができる。メンテナンスや修理終了後に、浸炭モジュールは閉じて真空にし、加熱し、短時間のうちに生産ラインに再び組み入れることができる。ガス焼入モジュールおよび搬送モジュールは、駆動装置を炉外に設置し、メンテナンスや修理を行いやすいように設計されている。メンテナンスを行う時や不具合が発生した時は、搬送モジュールはメンテナンスや修理を短時間で行うことができるメンテナンス専用位置へ移動する。高い実稼働率を維持するには適切な予防保全が不可欠であるが、浸炭モジュールの予防保全は前述の後部ドアから中に入って容易に行うことができる。頑強な構造と最適

化された処理プロセスにより、メンテナンス周期の長期化とメンテナンス費用の抑制が実現できている。

#### 4. 4 プロセス・フレキシビリティ

ModulTherm® では、さまざまな処理が可能である。ModulTherm® システムの大半は、パワートレイン業界で、変速機部品を真空浸炭、低圧浸炭、浸炭窒化によって表面硬化するために利用されている。

鍛造品に加え、粉末冶金（PM）材料も変速機部品に広く使用されている。しかし、これらの部品のガス浸炭・油焼入れにはさまざまなデメリットがある。たとえば、これらの材料は多孔質であるため、必要な浸炭プロファイルの形成は阻害される。表面積が大きな PM 部品、特にクロム合金の PM 部品においては、かなりの炉内雰囲気制御が必要となる。さらに、表面に細孔があるため、油焼入れ後の洗浄に手間がかかる。このような場合にも、真空浸炭・ガス焼入れのメリットを活かすことができる。6 つの浸炭モジュールをもつ ModulTherm® で PM スプロケットの表面硬化が行われている（Fig.9）。まず、形状校正作業で付着した残留油を部品から取り除く。この作業は 3 つの脱脂モジュールを使って行われ、ここで部品表面の油は真空中で除去される。次に、部品は第一搬送モジュールで 3 つの浸炭モジュールのうちの 1 つに搬送され真空浸炭処理される。その後、最高 2 MPa のヘリウムを使ったガス冷却モジュールでガス焼入れが行われる。

前述のとおり、この新しい熱処理技術はファイナルドライブのピニオンギア（傘歯車）の浸炭焼入れにも適用されている。Fig.10 は、8 つの浸炭モジュールをもつ ModulTherm® システムをベースとする全自動浸炭炉である。鋼種 16MnCr5 のピニオンは、アセチレンを使って真空浸炭され、2 MPa のヘリウムで焼入れられる。ModulTherm® と予備酸化炉、焼戻し炉は炉外の搬送システムで接続されている。さらに週末に無人稼働が可能な大きな部品バッファステーションにも接続されている。主制御システムが熱処理工程全体の制御と監視を全自動で行っている。

上記の例は、フレキシブルなモジュール式熱処理システムの優位性を示すもので、市場において、連続式システムに対する優位性が立証されている。現在、600 以上の浸炭モジュールを持つ約 100 基の熱処理システムが、世界中のパワートレイン業界でギア部品の量産に使用されている。この新熱処理技術の市場は今後も成長し続けるものと思われるが、特に 6 速自動変速機やデュアルクラッチ変速機のような高度な変速機の場合、その市場の

成長は明らかである。

## 5. まとめ

真空浸炭と高圧ガス焼入れの組合せは、パワートレイン業界で高負荷がかかるギア部品にとっては革新的な熱処理技術である。この技術は下記の特徴を持っている。

- 処理時間の短縮を可能にする高い炭素浸入性
- 粒界酸化がない
- 高い浸炭均一性と再現性
- 少ないプロセスガス消費量
- シンプルなプロセス制御
- 少ないエネルギー消費量
- 低ひずみ
- 光沢があり、きれいである
- 選択可能な焼入強烈度
- 機械加工ラインへの組み込みが可能

ModulTherm® のようなフレキシブルなモジュール式熱処理システムは、自動車産業界の生産設備に組み込まれる熱処理システムとして、大変適していることが実証された。

訳文責：中島智之