

# Comparison of technologies for stainless applications to I. C. engines exhaust manifold

S. Gallo, C. Mus, W. Nicodemi, G. Pontini

**B**oth existing new and expected future legislation for I.C. engine exhaust gas emissions are leading to change the automotive components with a view to limit the greenhouse effect and the atmospheric pollution.

Major effort will lead to a weight reduction of cars in order to reduce fuel consumption.

A high efficiency catalytic exhaust system will be a must in the next few years.

Exhaust manifolds in stainless steel are considered an interesting solution able to satisfy both weight saving and emission constraints. Innovative technologies that substitute the traditional cast iron solutions are:

- Hydroforming making manifolds by welding thin walled stainless steel tubes that have been shaped by hydraulic pressure

- Precision vacuum casting making manifolds as a single near net shape thin wall casting.

The employ of these technologies makes it possible to reduce the weight of a manifold by up to 40% and, thanks to the use of stainless steel, still support high optimal exhaust gas temperatures above 800 °C giving best catalytic converter performance results.

In addition less machining operations are required on both products if compared to traditional cast iron for a cost competitive part. Positive results have been obtained using ferritic and austenitic steels.

New solutions with innovative duplex stainless steel, recently introduced in automotive industry, are in development to achieve interesting performance of the final product.

## INTRODUCTION

The basic design and materials for exhaust manifolds have remained relatively unchanged until the eighties. Gray iron and nodular iron were satisfying requirements at operating conditions (i.e. gas temperature around 700°C) providing a good compromise between performances and costs [1].

During the 80's the development of catalyzed engines with improved performances lead to an increase of operating temperatures up to 900°C. In addition to the thermal fatigue life target the scaling resistance has become a must to avoid catalyst damaging. High Si-Mo nodular iron and Ni resist ductile iron were introduced to solve the problem. For higher temperatures the only reliable material solution is stainless steels (Figure 1). Stainless is today used on many luxury cars engine because of the high cost (material and transformation).

New regulation for emissions, low fuel consumption and car's component weight reduction is affecting the operating conditions and performances targets of the exhaust manifold for the year 2000. Not only luxury cars will be affected: a high demand for low cost stainless steel manifold will rise.

The demand for lower fuel consumption can be achieved with engines working close to the stoichiometric air/fuel ratio. This working condition leads to higher exhaust gas temperatures likely reaching the 950°- 1000°C as outlined in Figure 2.

Current materials will not provide adequate life at those temperatures also because of the trend in giving to the custo-

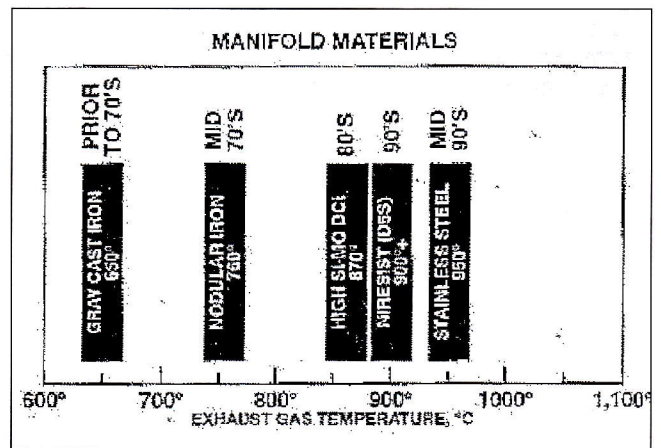


Figure 1 - Evolution of exhaust manifold materials .

Figure 1 - Evoluzione dei materiali per collettori di scarico.

mer an extension of vehicle warranty period or mileage. Stainless is likely to be the only alternative to satisfy these new trends.

Two interesting technologies to shape stainless into the complex geometry required by the design of exhaust manifolds are:

- Hydroforming
- LSVAC (Loose Sand Vacuum Assisted Casting) [2].

Based on the industrial experiences done so far, both of them could provide low cost solutions for high volume production. These technologies can be applied only to those steels that have precise features, for example the first technology needs a material with high plastic deformation and weldability, while for the second one good castability is re-

S. Gallo, C. Mus - *Teksid*  
W. Nicodemi - *Politecnico di Milano*  
G. Pontini - *Comau*

Memoria presentata al Convegno Internazionale Stainless Steel '99,  
Chia Laguna, 6-9 giugno 1999

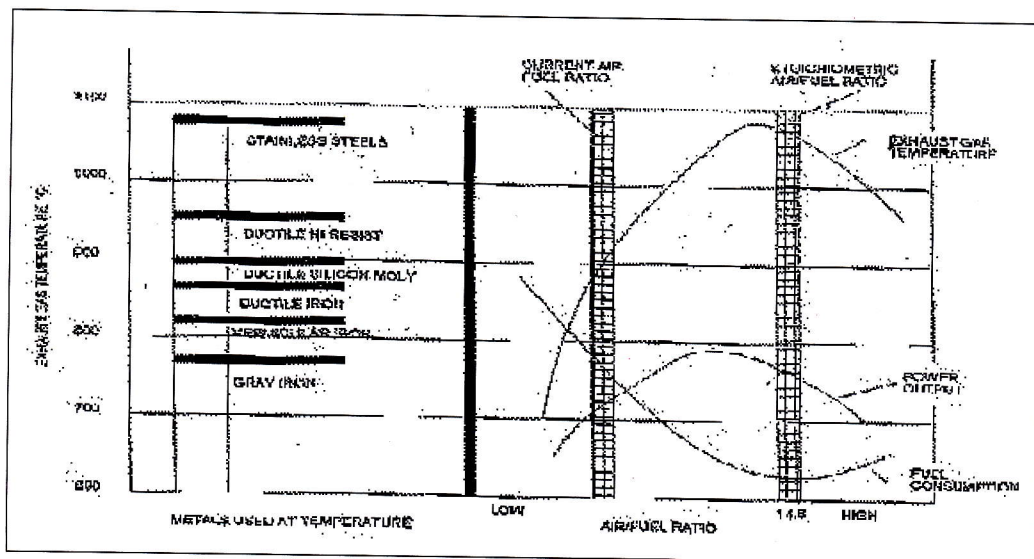


Figure 2 – Temperature limit for alternative materials and exhaust gas temperature.

Figura 2 – Temperature limiti per materiali alternativi e temperatura dei gas di scarico

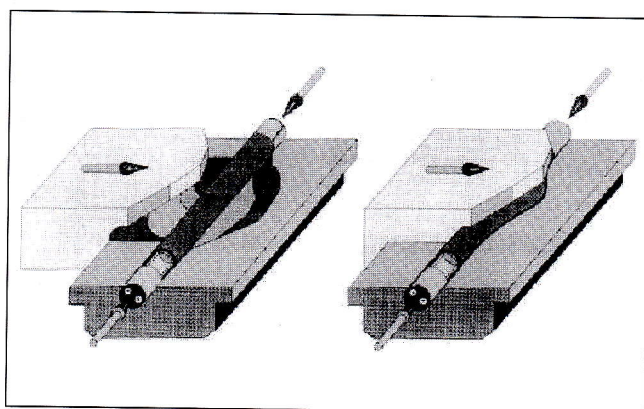


Figure 3 – Two typical hydroforming process steps.

Figura 3 – Due tipiche fasi del processo di idroformatura.

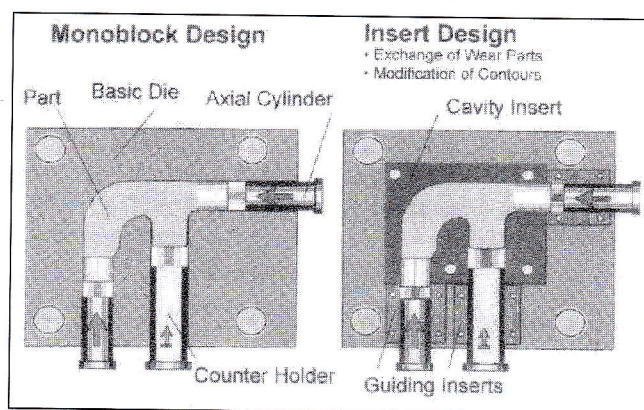


Figure 4 – Tool insert design for flexibility in the development stage.

Figura 4 – Disegno dell'inserto dello stampo in fase di sviluppo.

quired. Moreover these steels have not to change their structural properties during the maintenance at the working temperature (700-950 C) and their properties concerned with creep, environmental corrosion and thermal shock have to be good. [3]

### HYDROFORMING OF STAINLESS STEELS

The hydroforming process is increasingly widely used to produce complex closed section components for the automotive. Mild steel, deep drawing steel and aluminum have been successfully transformed into shaped components since the 1983 [4].

Technology development has made feasible also the shaping of stainless steel tubes. In industrial applications pre-bent, deburred ends tubular blanks are commonly used. These blanks are placed into a split die, the halves of which close to deform. Subsequently plungers are axially introduced to the tube ends sealing these against the hydraulic medium (water) to be injected. The medium is supplied and pressure applied by a separate high-pressure unit through bores in the plunger. The tube is forced into the internal contour of the die cavity. Pressure is then relieved when the blank is formed into the desired shape. Additional compression and expansion pressure can be applied in combination with internal water pressure to optimize deformation. (Figure 3) [5]. The control of the internal pressure, as well as the axial flow or compression of the material, in combination with volume

control and speed changing are of great importance for a successful forming.

Playing with tool design using inserts a flexibility can be achieved at competitive costs in the development stage, helping the achievement of short time to market (Figure 4).

Today, longitudinally welded tubes constitute the most cost-effective alternative for blanks. The weld seam has to be put in the less deformed area. Complex geometry has to be stress-free annealed after forming. In table 1 some stainless steel are showed than can be hydroformed into exhaust manifolds. In Figure 5 some examples of exhaust manifold today into production are presented [6]

### LSVAC (Loose Sand Vacuum Assisted Casting)

Oxidation and corrosion resistant alloys have been difficult to cast into thin sections using the traditional gravity casting methods due to the high melting point and low fluidity of these alloys.

The vacuum assisted processes have been recently improved (5) to satisfy high demanding design like exhaust manifold. In particular LSVAC not only makes thinner (2.5 mm) and larger castings possible, but also results in significantly lower production costs and less core sand use.

In the LSVAC process (Figure 6) a preformed aluminum foil covers a contoured mold base. Molds and a casting flask are placed on the foil and dry unbonded sand is used to fill the rest of the flask. The molds are very thin walled, usually

Table 1: Stainless steel for hydroforming.

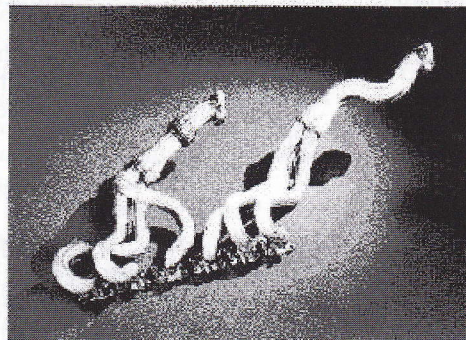
Tabella 1: Acciai inossidabili per idroformatura.

Material	Rp (N/mm <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	A 80 %	Notes
I.4016	> 270	450-600	> 18	Hard to shape
I.4512 X6CrTi12	> 220	390-560	>20	Applied in cooler area Difficult to shape
I.4509 X6CrTiNb12	> 290	420-600	>20	High heat resistance suitable for hot areas
I.4541 X6CrNiTi1810	> 230	540-740	>40	
I.4401 X5CrNiMo17122	> 240	550-700	>40	
I.4828 X15CrNiSi2012	> 230	500-750	>22	
I.4301 X5CrNi1810	> 220	550-750	>40	Easy to shape

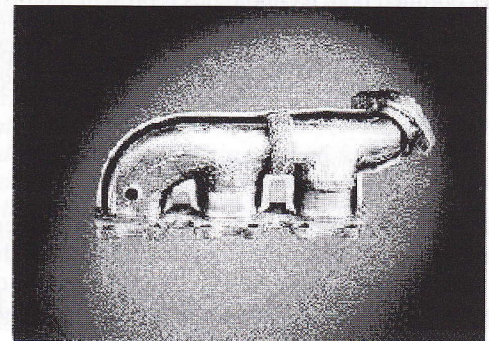
Figure 5 – Example of exhaust hydroformed manifold in production.

Figura 5 – Esempio di collettori di scarico idroformati attualmente in produzione.

Example of Application: Exhaust Systems



Exhaust manifold BMW M3  
Input pipe:  $\varnothing$  32 x 2 mm  
 $\varnothing$  48,3 x 2 mm  
Material: 1.4301  
Series manufacturer: Schmitz – Brill GmbH



Exhaust manifold Mercedes 6 cylinder  
Input pipe:  $\varnothing$  42 x 1,25 mm  
 $\varnothing$  48,3 x 2 mm  
Material: 1.4828, 1.4893  
Series manufacturer: Leistritz GmbH

Figure 6 – LSVAC process applied to exhaust manifold.

Figura 6 – schema del processo LSVAC applicato a collettori di scarico.

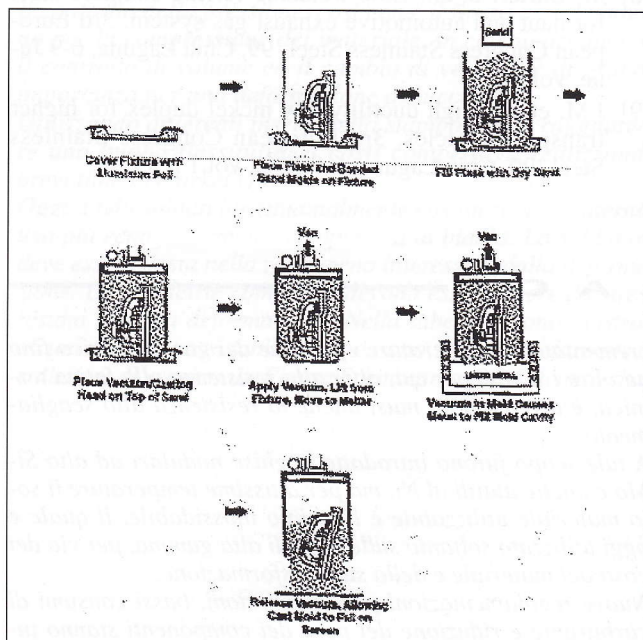


Figure 7 – Thin walled exhaust manifolds made by the LSVAC process.

Figura 7 – Collettori di scarico a parete sottile realizzati con il processo LSVAC.

from 3 mm to 12 mm. The dry sand supports the mold so wells that the mold needs only to be thick enough to handle. A vacuum head is placed in the flask and vacuum is applied. The vacuum rigidifies the sand and holds the foil tightly against the sand and the mold. The flask is then moved to a furnace of steel and dipped into its surface. The foil melts immediately and the metal fills the mold very rapidly. The fast filling time combined with vacuum control guaranty a good quality of the thin walls.

A ferritic stainless steel has been developed for exhaust manifolds with a low coefficient of thermal expansion if compared to austenitic and high Si-Mo irons.

The nominal composition of this alloy is 12.5% Cr, 1.8% Si, 0.03% C stabilized with Ti and Nb.

An intensive activity of research is under way in order to evaluate other stainless steel with improved thermal fatigue properties.

Automated production equipment for LSVAC process became operational in early 1996. In figure 7 various types of thin wall stainless steel manifolds are showed.

TECHNICAL AND ECONOMICAL COMPARISON

As outlined both technologies represent interesting alternatives to produce exhaust manifolds for the engines of the years 2000. In the following table 2 an attempt of technical and economical comparison has been described.

CONCLUSION

Stainless steels represent today the only alternative materials to cast iron for the future hotter parts of the exhaust system (exhaust manifolds). To penetrate the automotive market for high volume production a cost reduction of the components has to be achieved.

New technologies are available to shape stainless steels into complex geometry required by the engine designers at interesting cost.

Further developments are required to optimize customized steels for both transformation technologies here described (hydroforming and LSVAC).

The aim of this work is to show the two alternative technologies to produce the exhaust manifolds. Certainly, the new developments of these technologies will depend on several kinds of stainless steels that can satisfy the technological needs and the operative conditions[8].

The best possibilities of success seem to belong to the last generation of ferritic stainless steel, but there is also the possibility to design new and suitable duplex stainless steels that are already present in the field of automotive manufacturers [9].

Topic	Hydroforming	LSVAC
Minimum wall thickness (mm)	1.0 - 1.5	1.5- 2.0
Variable section	Yes	Yes
Variable thickness	No	Yes
Roughness	+++	+
Part integration	+	+++
Weight reduction	+++	++
Component life		
Oxidation resistance	+++	+++
Thermal fatigue	++	+++
Visual appearance	+++	+
Cost		
Production cost	00	00
Piece cost	0	0
Tooling	00	0
+++ very good ++ good + bad 00 high 0 low		

Table 2. Technical and economical comparison.

Tabella 2. confronto tecnico ed economico tra i due processi.

AKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Hitchiner (Mr. Chandley and Mr Mikkola) and Schuler Hydroforming (Mr. Totta and Mr. Ciaccia - Italian representatives) for the information supplied.

REFERENCES

- [1] G.D. CHANDLEY, J. REDEMSKE, J. JOHNSON, R. SHAW, P. MIKKOLA, Exhaust manifolds in stainless steel, SAE Paper 970920, 1997
- [2] G.D. CHANDLEY: The LSVAC process, SFSA, 1997
- [3] T. Sunami et al., Global market development forum for stainless steels, Toronto, Canada, 1992, June, p. 45
- [4] HYDROFORMING CONGRESS, Nov. 1997, Bochum (D)
- [5] D. SCHMOECKEL, The hydroforming of stainless steel, IPT Darmstad Internal Document, 1998
- [6] SCHAFFER Hydroforming- Shuler Group (D). Internal document, 1998
- [7] HITCHINER MANUFACTURING CO. - USA
- [8] M. Barteri et al., Low weldable ferritic stainless steel for haut and automotive exhaust gas system, 3rd European Congress Stainless Steel '99, Chia Laguna, 6-9 June, vol.1 p.75
- [9] J.M. et al., High ductility low nickel duplex for higher transport vehicles, 3rd European Congress Stainless Steel '99, Chia Laguna, 6-9 June, vol.1 p.85

ABSTRACT

COMPARISON OF TECHNOLOGIES FOR STAINLESS APPLICATIONS TO I.C. ENGINES EXHAUST MANIFOLD

I criteri di progettazione ed i materiali utilizzati per realizzare i collettori di scarico sono rimasti invariati fino all'inizio degli anni '80, questo perché i requisiti sia della ghisa grigia che di quella nodulare soddisfacevano le condizioni d'esercizio (temperatura dei gas esausti intorno a 700°C), provvedendo, inoltre, ad un buon compromesso tra performance e costi. Durante gli anni '80 lo sviluppo dei motori catalizzati ha in-

crementato le temperature operative dei gas di scarico fino ad oltre i 900°C per cui, oltre alla resistenza alla fatica termica, è diventato un must anche la resistenza allo scagliamento.

A tale scopo furono introdotte le ghise nodulari ad alto Si-Mo e quelle duttili al Ni, ma per altissime temperature il solo materiale utilizzabile è l'acciaio inossidabile, il quale è oggi utilizzato soltanto sulle auto di alta gamma, per via dei costi del materiale e della sua trasformazione.

Nuove regolamentazioni per le emissioni, bassi consumi di carburante e riduzione del peso dei componenti stanno in-

fluenzando le condizioni operative ed i target di prestazioni per i collettori di scarico degli anni 2000. Pertanto si prevede una grossa domanda di collettori d'acciaio inossidabile a basso costo. La richiesta di più bassi consumi di carburante può essere raggiunta, infatti, con motori che lavorano vicini al rapporto stechiometrico aria/carburante. Questo comporta un aumento della temperatura dei gas di scarico fino a 950°-1000°C, come mostrato nella figura 2.

I materiali standard non consentono una vita adeguata del componente a queste temperature: gli inossidabili sono, probabilmente, l'unica soddisfacente possibilità.

Due interessanti tecnologie, che consentono di realizzare le geometrie complesse richieste per i collettori di scarico, sono:

- Idroformatura
- LSVAC (Loose Sand Vacuum Assisted Casting) [2]

Sulla base d'esperienze industriali già fatte, entrambe potrebbero costituire soluzioni a basso costo per alti volumi produttivi.

Queste tecnologie possono essere applicabili soltanto a quegli acciai che hanno precise caratteristiche, infatti, la prima richiede un materiale saldabile e ad alta deformabilità plastica, mentre la seconda richiede un'elevata colabilità.

Questi acciai, inoltre, non devono cambiare le loro proprietà strutturali alle elevate temperature di lavoro (700-950°C) così come la resistenza al creep, alla corrosione ambientale, allo shock termico devono essere buone [3].

#### Idroformatura di acciai inossidabili

Il processo d'idroformatura è sempre più utilizzato per realizzare componenti complessi a sezione chiusa per le automobili. Acciai dolci, acciai ed allumini per imbutiture profonde, sono stati, con successo, trasformati già dal 1983 [4].

Lo sviluppo della tecnologia ha reso realizzabile anche la formatura di tubi d'acciaio inossidabile. Nelle applicazioni industriali sono comunemente utilizzati tubi sbozzati di fucina (blanks) prepiegati. Questi sono posizionati all'interno di uno stampo la metà del quale si chiude a deformato. Successivamente vengono introdotti assialmente degli stantuffi alla fine dei tubi, chiudendoli, ermeticamente mentre la pressione idraulica (acqua) viene esercitata. La pressione è applicata attraverso i fori dello stantuffo. Il tubo è forzato all'interno del contorno della cavità dello stampo. La pressione è poi rilasciata quando lo sbozzato è stato formato ad assumere la forma desiderata. Un'addizionale compressione ed espansione possono essere applicate in combinazione con la pressione interna dell'acqua per ottimizzare la deformazione. (Figure 3) [5].

Il controllo della pressione, così come il flusso assiale interno per la compressione del materiale, in combinazione con il controllo di volume ed il cambio di velocità è di grande importanza per una deformazione di successo.

Utilizzando differenti inserti nello stampo si può raggiungere una buona flessibilità a costi competitivi, realizzando brevi time to market. (Figure 4).

Oggi, i tubi saldati longitudinalmente costituiscono l'alternativa più economicamente competitiva ai blanks. La saldatura deve essere posta nella zona meno interessata dalla deformazione. Le geometrie complesse devono essere libere da stress residui dopo la deformazione. Nella tabella 1 sono mostrati alcuni acciai inossidabili che possono essere idroformati in collettori di scarico. In Figure 5 sono presentati alcuni esem-

pi di collettori di scarico oggi in produzione [6].

LSVAC (colata sotto vuoto a sabbia non legata)

La tradizionale colata a gravità in pareti sottili di leghe resistenti alla corrosione, è sempre stata difficoltosa per via dell'alto punto di solidificazione ed della bassa fluidità di queste leghe.

Per soddisfare l'elevata esigenza del complesso design dei collettori di scarico, sono stati recentemente migliorati (5) i processi di vuoto assistito. In particolare il processo LSVAC permette la realizzazione dei getti più sottili (2.5 mm) e più larghi possibili, con i costi di produzione più bassi.

Nel processo LSVAC (Figure 6) un foglio d'alluminio sigilla il fondo della motta. Dopo aver posto il flask, con la motta all'interno, sul foglio si riempie il resto del flask con sabbia asciutta non legata. Le motte sono a parete sottilissima, usualmente da 3 a 12 mm. La testa del sistema del vuoto si posiziona sul flask ed il vuoto è applicato. Il vuoto irrigidisce la sabbia e tiene il foglio tra la sabbia e la motta.

Il flask è poi spostato sul forno dell'acciaio ed abbassato sulla sua superficie. Il foglio fonde immediatamente ed il metallo riempie la motta molto rapidamente. Il veloce tempo di riempimento combinato con il controllo del vuoto garantisce la buona qualità delle pareti sottili.

Un acciaio inossidabile a struttura ferritica è stato sviluppato per collettori di scarico con un basso coefficiente d'espansione termica se comparato ad un austenitico e alle leghe ad alto tenore di Si-Mo.

La composizione nominale di questa lega è 12.5% Cr, 1.8% Si, 0.03% C stabilizzata con Ti e Nb.

Un'intensa attività di ricerca è in corso per valutare altri acciai inossidabili con migliori proprietà di fatica termica.

Impianti automatici LSVAC sono in produzione dall'inizio del 1996. Nella figura 7 sono mostrati vari tipi di collettori d'acciaio inossidabile a parete sottile.

#### Confronto tecnico ed economico

Come già evidenziato entrambe le tecnologie rappresentano interessanti alternative per produrre collettori di scarico per i motori degli anni 2000. Nella seguente tabella 2 è descritto un tentativo di confronto delle caratteristiche economiche e meccaniche.

#### Conclusioni

Gli acciai inossidabili rappresentano oggi la sola alternativa alle ghise fra i materiali per i sistemi di scarico per le crescenti temperature d'esercizio. Per modellarli nelle forme complesse richieste dai progettisti di motori sono ora disponibili nuove tecnologie a costi interessanti.

Ulteriori sviluppi sono richiesti per ottimizzare acciai speciali per entrambe le tecnologie di trasformazione qui descritte (Idroformatura e LSVAC).

L'obiettivo di questo lavoro è mostrare le due tecnologie alternative per produrre collettori di scarico. Certamente, i nuovi sviluppi di queste tecnologie dipenderanno dai diversi tipi di acciai inossidabili che potranno soddisfare le esigenze di queste tecnologie e le condizioni operative [8]. Le migliori possibilità di successo sembrano appartenere all'ultima generazione d'acciai inossidabili ferritici, ma c'è anche la possibilità di progettare nuovi e adatti acciai inossidabili duplex che sono già presenti nel campo delle costruzioni automobilistiche [9].