

<논문 or 기술논문 택일>

## 고온성형 위한 고강도보론강의 기계적 특성 및 마이크로구조 연구

이종신<sup>†</sup> · 채명수\* · 박춘달\* · 김영석\*\*

### Mechanical and microstructural characteristics of a high-strength boron-alloyed steel for hot press forming

Lee Jongshin, Chae Myoungsu, Park chundal and Kim youngsuk

**Key Words:** Hot press forming(고온 프레스 성형), High strength boron-alloyed steel(고강도보론합금강), Mechanical properties(기계적 특성), Microstructural characteristics(마이크로구조 특성), Quench(퀵칭), Die design(금형설계)

#### Abstract

The use of high strength steels are gradually increasing to reduce the weight of automobile to improve the environmental problems and collision safety. To encounter the traditional disadvantages of high strength steels like as a poor formability and high springback, hot press forming has been developed. By this method, the strength of steel sheet is increased about three times of original one through die quenching process. In order to the design of hot press forming tools by using numerical simulation, the knowledge of mechanical and microstructural characteristics are required. This study show the mechanical and microstructural characteristics of a high strength boron-alloyed steel according to the various quenching conditions.

#### 1. 서 론

오늘날 자동차 산업은 배기가스 감소에 의한 지구 환경 문제의 개선과 충돌성능 향상에 의한 고안전성을 요구받고 있다. 따라서 완성차 제조사들은 차량경량화와 고강성차체를 실현하기 위해 알루미늄합금 강판, 마그네슘합금 강판 등의 신소재를 이용하거나 하이드로포밍, 용접블랭크 등의 신공법을 이용하여 차체를 제작하고 있다.

그러나 알루미늄합금 강판이나 마그네슘합금 강판 등이 스틸 강판에 비해 차체 중량을 줄이는 효과는 있지만, 가격이 비싸고 성형성이 열악하여 실제 차체 제작에는 적용상 제한이 많다. 이에 반해, 스틸 강판의 특성을 유지하며 차체 중량을 줄이기 위해 강판 제조사들은 Trip강판, DP 강판 등의 고강도강판을 개발하여 보급하고 있으며, 최근에는 1000MPa급 이상의 초고강도강판도 개발하여 적용하고 있다. 그러나 일반적으로 고강도강판은 낮은 연신율과 높은 항복강도 때문에 성형성이 열악하고 성형 후 잔류응력에 의한 스프링백 현상 등의 문제점을 안고 있기 때문에 차체 제작에 사용하기 위해서는 상당한 성형 기술이 요구된다. 이러한 고강도강판의 성형성 문제

<sup>†</sup> 회원, 경북대학교 기계공학부  
E-mail : jongsinlee@knu.ac.kr  
TEL : (053)950-5580

\* 회원, 경북대학교 기계공학부

\*\* 회원, 경북대학교 기계공학부 교수

를 해결하고 성형 후 매우 높은 수준의 강성을 유지하는 자동차 차체 부품을 제조하기 위하여 핫프레스포밍(Hot press forming)이라는 새로운 공법이 개발되었다. 핫프레스포밍은 성형하기 전에 블랭크(Blank)를 Ac3 변태점 온도와 같거나 높은 온도 조건에서 조직을 완전 오스테나이트(Austenite)로 만든 후, 성형과 동시에 금형 내부에서 퀴칭(Quenching)을 실시하여 조직을 마르텐사이트로 변화시킨다. 통상적으로 이러한 핫포밍 공법에 의해 제조되는 부품은 원소재가 가진 인장강도의 약 3배 가까이 증가하게 되어 300MPa 정도의 인장강도가 최종적으로는 1500MPa 이상의 인장강도를 가진 부품이 되는 것이다. 그림 1에 핫포밍 성형 공정에 따른 항복강도와 연신율과의 관계를 나타내었다.

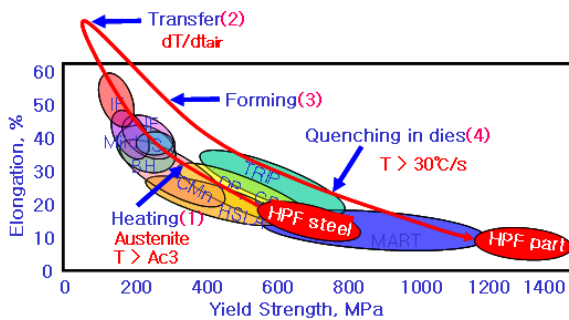


Fig. 1 Yield Strength and elongation states on hot press forming process

핫프레스포밍은 유럽 자동차 제조사와 강관 제조사에 의해 개발되었으며, 현재에도 활발한 연구가 진행되고 있다. A. Turetta<sup>(1)</sup>, M.Merliein<sup>(8)</sup> 등은 핫포밍 전용 소재인 보론 첨가강(22MnB5)에 대해 열추적 카메라를 이용하여 CCT 곡선을 작성하고 단축인장 시험으로 고온 유변 데이터를 구하였고, M. Merklein<sup>(2)</sup>, H.Hoffmann<sup>(7)</sup> 등은 같은 소재에 대해 열적 기계적 물성치가 온도와 시간 특성에 의해 좌우됨을 확인하였다. T. Asai<sup>(3)</sup>, D.Lorenz<sup>(5)</sup> 등은 보론 첨가강을 이용하여 고온에서 딥드로잉을 실시하였다. 이 연구에서 초기 블랭크의 가열 온도, 성형 개시 온도 그리고 성형 완료 후 산화피막 특성에 대해 관찰하였는데, 성형성에 영향을 주는 인자들로는 블랭크의 마이크로 구조, 성형 개시 온도 그리고 가열된 블랭크의 산화피막층 등임을 확인하였다. M. Suehiro<sup>(4)</sup> 등은 알루미늄 피막을 도포한 핫포밍 전용 소재

(USIBOR1500)에 대해 고온 물성치 특성을 평가하였다. 본 연구에서는 핫포밍 전용 소재인 JFE12A를 사용하여, 초기 블랭크 가열 온도 조건, 템퍼링 조건, 퀴칭 조건 등의 공정 변수들이 경화 특성과 마르텐사이트 조직 생성에 미치는 영향 등을 파악하였다.

## 2. 핫프레스포밍 공정의 개요

핫프레스포밍 공법은 고온에서의 양호한 성형성과 스프링백 특성을 이용하여 성형한 후 급속 냉각을 통하여 마르텐사이트 조직을 얻음으로써 강관의 강도를 향상시키는 공법이며, 성형 전후 소재 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Tensile properties before and after hot press forming

	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)
As received	394	615	26
As formed	1,280	1,530	8

그림 2는 보론 첨가 강에 대한 CCT 곡선과 마르텐사이트 조직을 얻기 위한 최소 냉각 속도이다. 즉, 브리넬 경도값 429(HV430) 이상을 얻기 위해서는 냉각속도가 약 25°C/s 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 이러한 냉각 속도를 실현하기 위한 성형 방법으로서 초기 블랭크 가열부터 최종 퀴칭까지의 공정을 그림 3에 나타내었다.

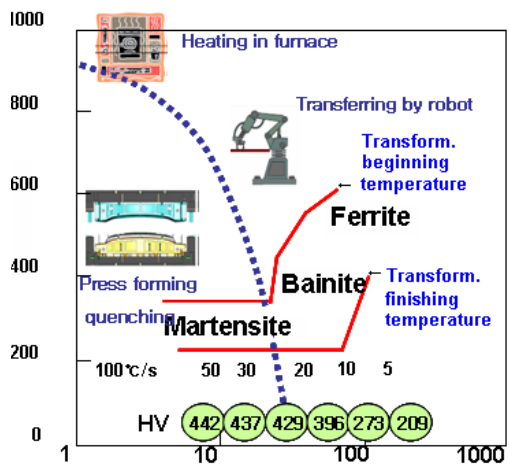


Fig. 2 Cooling condition on CCT curve for high strength boron-alloyed steel

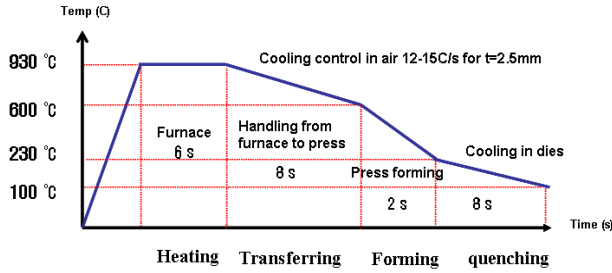


Fig. 3 Time and temperature conditions for hot press forming processes

시간과 온도에 따른 핫포밍 성형공정은 일반적으로 850~950°C에서 5~15분 정도 블랭크를 가열하여 소재의 조직을 완전 오스테나이트로 변태시킨 후 8초 정도에 금형으로 이동시킨다. 특히 탄소 함량이 0.2wt% 이상인 소재에 있어서는 반드시 850°C 이상 가열하여야만 완전한 오스테나이트 조직을 얻을 수 있다. 소재 이동은 마르텐사이트 변태 온도인 Ac2 이내에서 이루어져야 한다. 이송이 완료되어, 금형 위에 안착된 블랭크는 이동과정에서 약 200°C 이상의 온도가 하강하게 되며, 따라서 약 600°C 내외에서 성형이 이루어진다. 약 2초 정도의 성형 과정 후, 금형에 설치된 냉각홀을 통하여 냉각이 이루어져 조직은 마르텐사이트로 변태하게 되며, 금형을 그대로 유지하여 소재가 약 100°C 내외가 될 때까지 충분한 쿨칭이 이루어지도록 한다. 이때 금형 내부에 설치된 냉각홀에 의해 이루어지는 쿨칭을 특히 다이 쿨칭이라고 한다.

### 3. 실험방법 및 결과

#### 3.1 핫프레스포밍 따른 고강도보론강의 평가

본 실험은 핫프레스포밍 공정 조건이 기계적 물성치와 마이크로 구조에 미치는 영향을 파악하는 것이 목적이다. 따라서 공정 변수는 블랭크 가열 온도 조건, 가열 시간 조건, 템퍼링 공정 조건을 선정하여 실험하였다. 실험 조건에 대한 상세한 내용은 그림 4에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 소재는 고강도 보론강으로서 두께가 2.5mm, 지름이 90mm, 길이가 90mm인 실린더 형상의 파이프로며, 화학 조성과 기계적 물성치를 표 4에 각각 나타내었다.

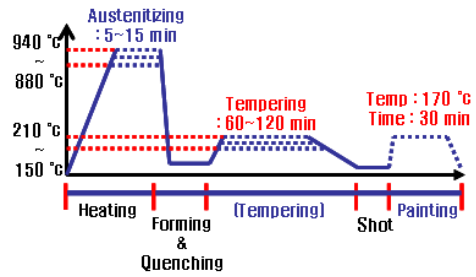


Fig. 4 The schematic process of hot press forming and experimental conditions

NO	Heating Temp (°C)	Heating time (min)	Tempering Temp (°C)	Tempering Time (min)
1	880	5	150 °C	60
2	880	10	180 °C	90
3	880	15	210 °C	120
4	910	5	180 °C	120
5	910	10	210 °C	60
6	910	15	150 °C	90
7	940	5	210 °C	90
8	940	10	150 °C	120
9	940	15	180 °C	60

Table 4 chemical composition and mechanical properties of tested material

Material	Chemical composition (mass %)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	Cr	B	YS	TS	EI
JIS12A	0.19	0.18	1.39	-	0.002	485	578	26



실험 조건은 가열 온도 조건 880°C, 910°C, 940°C, 가열 시간 조건 5min, 10min, 15min 등의 각각 세가지 조건에 대해 실험하였다. 그리고 잔류 오스테나이트를 제거하기 위하여 템퍼링을 실시하였다. 템퍼링 온도는 150°C, 180°C, 210°C이고 유지 시간은 60min, 90min, 120min에 대해 실험하였다. 쿨칭은 20°C의 물을 이용하여 실시하였으며, 가열로는 일반 전기로를 사용하였다.

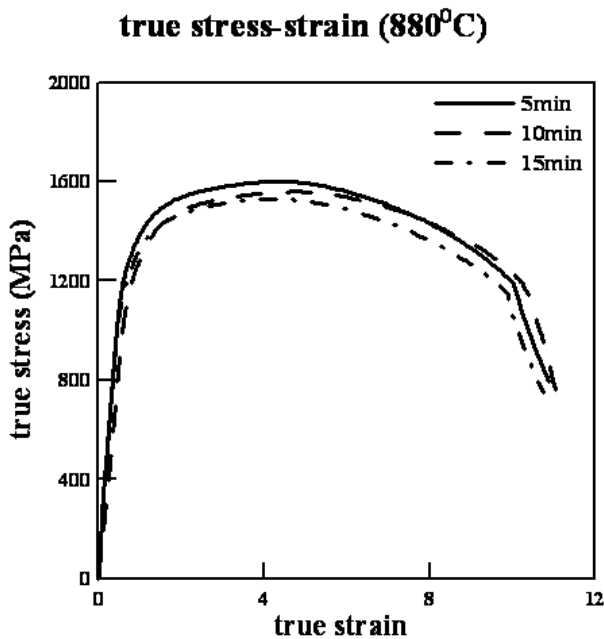
효율적인 실험을 위하여 다구찌의 실험계획법을 이용하여 실험 조합을 작성하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

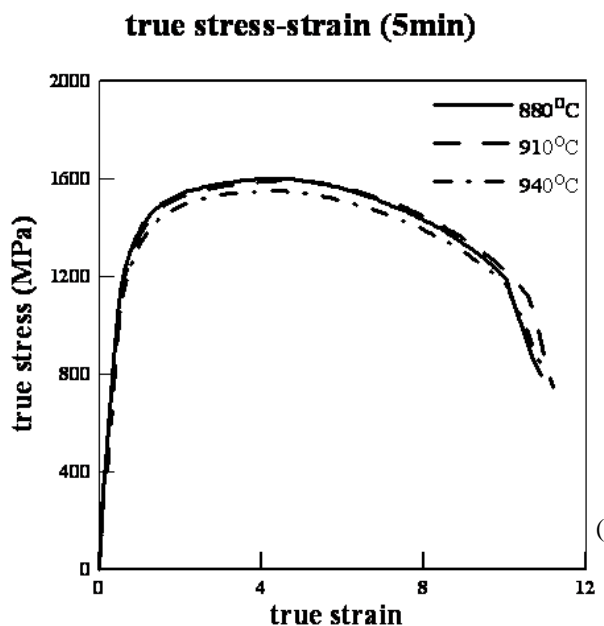
핫프레스포밍 실험을 수행한 후, 각 실험 조건에 따른 기계적 물성치를 평가하기 위해 단축인장시험과 경도 측정을 실시하였으며, 마르텐사이트 조직을 관찰하기 위해 SEM 촬영을 실시하였다.

3.2.1 실험 조건에 따른 인장시험 결과

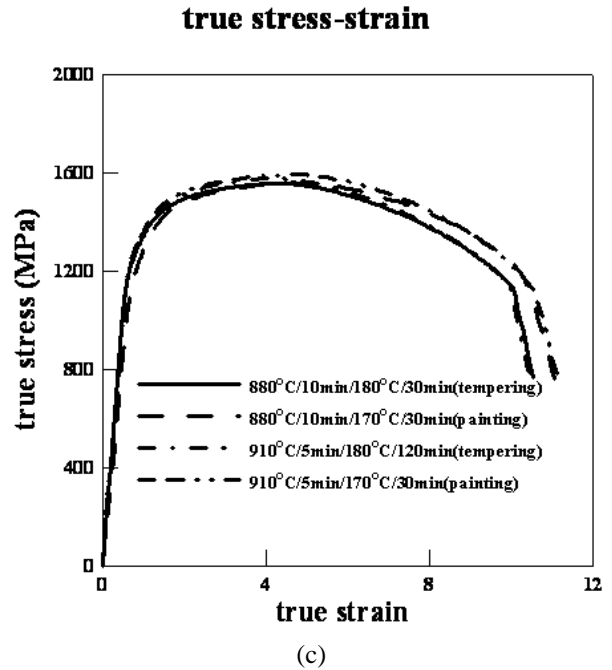
그림 5는 각각 소재 가열 온도, 가열 시간 및 템퍼링 유무에 따른 단축인장시험 결과를 비교하여 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Results of uniaxial tensile tests for hot press formed specimens

그림 (a)에서 볼 수 있듯이 가열온도를 일정하게 유지하고 가열 시간 조건을 다르게 하였을 때 기계적 물성치를 평가한 결과 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 또한 그림 (b)에서 볼 수 있듯이 가열시간을 5분으로 일정하게 유지하고 가열 온도 조건을 변경한 실험결과 또한 기계적 물성치는 뚜렷한 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 실험결과 (a), (b)를 바탕으로 가열 온도와 가열 시간에 따른 조건의 차이는 소재의 기계적 물성치에는 영향을 미치지 않는다. 그림(c)에서는 템퍼링 유무에 따른 기계적 물성치를 평가하였다. 그림 (a), (b)에서 볼 수 있듯이 템퍼링 온도와 시간 조건에 차이에 따른 기계적 물성치의 차이는 뚜렷한 변화가 없으며, 또한 템퍼링 공정의 유무의 차이 또한 뚜렷한 차이가 없기에 페인팅 공정이 템퍼링 효과를 대체할 수 있다.

3.2.2 실험 조건에 따른 경도 측정 결과

그림 6은 각각 소재 가열 온도, 가열 시간 및 템퍼링 유무에 따른 경도 측정 결과를 나타내었다.

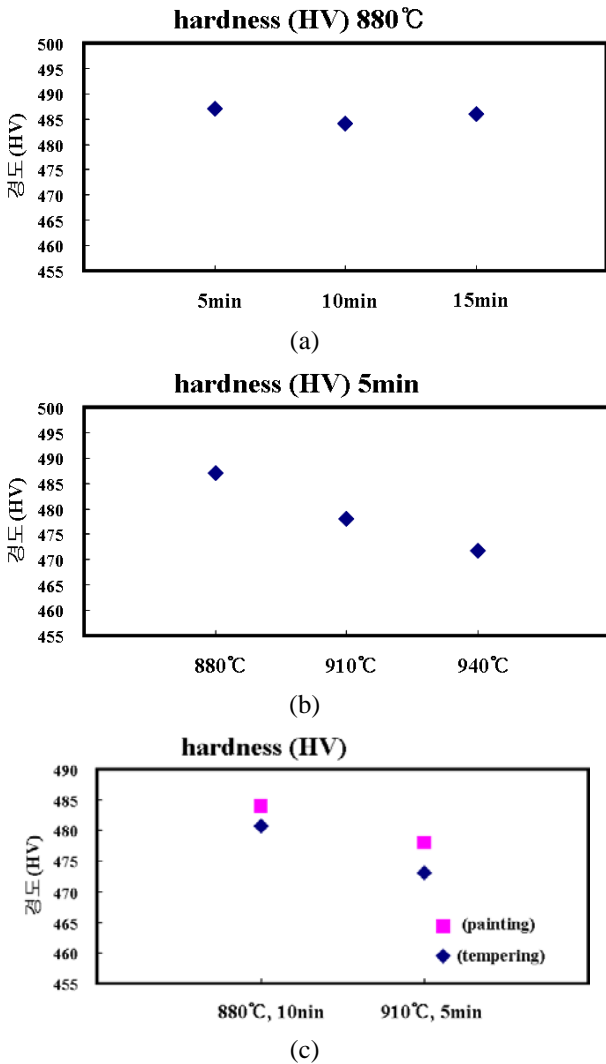


Fig. 6 Results of hardness(HV) measurement for hot press formed specimens

그림 (a)에서 볼 수 있듯이 가열 온도를 일정하게 유지하고 가열 시간 조건을 다르게 하여 실험한 후 경도 측정결과 경도에는 영향을 미치지 않았다. 그러나 그림 (b)에 볼 수 있듯이 가열 시간을 일정하게 유지하고 가열 온도 조건을 변경하여 실험한 후 경도를 측정한 결과는 가열온도가 높을수록 경도가 낮아지는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 쿨칭에 사용된 물의 온도가 20°C로 일정하게 유지된 상태에서 높은 온도로 가열한 소재를 쿨칭 할 때보다 냉각속도가 빠르지 않기 때문이라고 판단된다. 그림 (c)에서 볼 수 있듯이 경도는 템퍼링 유무의 차이보다는 냉각속도

의 차이에 따라 영향을 미치는것을 알 수 있다.

### 3.2.3 상온에서의 이송 시 온도변화

핫프레스포밍에서는 성형 공정간에 이송에 의한 온도 하강이 발생한다. 상온에서의 온도 변화의 실험은 소재를 가열한 후 금형으로 이송되는 공정에서 시간에 따른 온도 변화를 측정함으로써 이송에서 발생할 수 있는 페라이트, 펄라이트 조직 생성을 막기 위한 조건 설정과 마르텐사이트 시작 온도인 600°C 이내에서 성형 완료하기 위한 최적 이송 시간을 설정하기 위하여 본 실험을 실시하였다.

가열 온도 880°C, 910°C 그리고 940°C 에 대해 5분간 가열한 후 마르텐사이트 시작 온도인 600°C까지 온도가 하강하는 시간을 측정하였다. 외부 조건은 대기 조건인 상온에서 실험하였다.

표 5은 각 가열 온도에 대해 600°C까지의 온도 하강에 소요된 시간을 나타낸다.

Table 5 Cooling rates measured on air condition according to the elevated temperatures

Time (s)	Temperature ( °C )		
5	880	910	940
10	700	720	740
15	670	670	720
20	630	625	685
25	590	610	653
30	570	600	620
35	560	580	590

averaged cooling rate in air

Temperature ( °C )	880-590	910-600	940-590
Air cooling rate ( °C/s )	14.5	12.4	11.7

본 실험에서 각각의 가열온도에서 마르텐사이트 온도인 약 600°C까지 측정한 결과 로에서 시편을 꺼낸 후 10초 까지는 온도가 급속하게 떨어지지만 10초 후 약 700°C 정도의 온도가 되면 온도하강속도가 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 표 3 에서도 볼 수 있듯이 평균시간은 약 30초이고 온도하강속도는 11.7~14.5°C/s이다. 소재 가열 후 이송과 포밍의 완료가 약 30초 내에서 일어난다면 마르텐사이트 조직을 생성할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 핫프레스포밍 공법을 이용하여 기계적 물성치 평가와 마이크로 구조를 관찰하기 위하여 다양한 공정조건에서 실험을 실행하였다. 그리고 기계적 물성치 평가와 마이크로조직을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

기계적물성치는 :

1. 가열 온도 및 시간의 차이에 따른 특성은 나타나지 않았다.
2. 템퍼링 유무의 다른 차이 또한 나타나지 않아 도장 공정이 템퍼링 효과를 대체할 수 있음을 알 수 있다.
3. 가열 온도 차이에 따른 경도의 변화는 나타나지 않았지만 냉각 속도에 따른 경도의 차이가 나타났다.
4. 각각의 가열 온도에서 온도하강을 측정할 결과 10초 안에 온도는 급속하게 떨어지지만 70 0℃ 이후에는 온도하강속도가 점차적으로 감소한다.
5. 마르텐사이트 온도인 600℃ 이전에 이송과 성형을 완료하기 위해서는 두 공정의 총 시간은 30초안에 이루어 줘야한다.

#### 후 기

본 논문은 2006년 산업자원부의 지원과 BK21 지원 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) A.turetta, S.Bruschi, A.Chiotti "Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operation" Journal of materials Processing Technology 117(2206)396-400
- (2) M.Merklein, C.Hoff, "characterization of the flow properties of the quenchnable ultra high strength steel 22MnB5, Ann, CIRP 55 (1) (2006)
- (3) Tatsuva Asai, Jiro Iwaya. "Hot stamping drawability fo steel" sheet Products Research & Development Section Research & Development Laboratories KaKogawa Works, Iron&steel sector

KOBE STEEL, LTD

- (4) M.Suehire, K,Kusumi, T.Miyakoshi, J.Maki M. Ohogami " Properties of aluminium-coated steels for hot-forming, Nippon steel techical Reoport No. 88, July 2003.
- (5) D.Lorenz, K.Roll, "Simulatuon of hot stamping and quenchibg of boron alloyed steel" on Mat.Forming, Trondheim, Norway, 2004
- (6) M. Eriksson, M.Oldenburg, M.c.Somani, L.P. Karjakanien, "Testing and evaluation of material data for analysis forming and hardening of boron steel components, Simul. Mater. Sci. Eng. 10 (2002) 227-294
- (7) H.Hoffmann, Chr. Vogl, Determiantion of True stress-strain curves and anisotropy in tensile test with optical deformation measurement, Ann. Girp 52 (1) (2003) 217-220
- (8) M.Merklein, C.Hoff, "characterization of the flow properties of the quenchnable ultra high strength steel 22MnB5, Ann, CIRP 55 (1) (2006)