2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Zr-2.5%Nb 합금에서 하중-변위 곡선을 사용하여 파단 변형까지 구한 진응력-진변형 곡선 (True stress-true strain curve calculated from the load-displacement curve in Zr-2.5%Nb alloy)

김성수*, 임경수, 정용무, 김영석

한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150

요약

인장시험은 재료의 기계적 성질 뿐만 아니라 가공 경화 능력과 같은 변형 관련 자료를 제공하는 유용한 시험 방법이지만 necking이 일어나면 정량적인 해석이 불가능하여 necking 이후의 인장 시험 결과는 유용성이 매우 낮았다. 이 한계를 극복하기 위하여 시험편 전반에 걸친 변형 분포를 측정하고 주어진 변형까지의 변형의 합을 변위로 번환할 수 있는 방법이 고안되었다. 이를 바탕으로 necking 부분에서 파단 변형 (단면수축률)까지 변형에 따른 진응력-진변형 곡선을 해석적으로 도출하였다. 열처리를 통하여 10 마이크로미터 정도의 결정립을 가진 압력관 재료를 사용하여 인장 시험한 시험편에 대한 진응력-진변형 곡선을 사용하면 54% 정도까지 계속 강화되는 것과 상기의 개념이 유효하다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

Although the tensile test is a useful method that provides not only the mechanical properties but also the deformation parameters such as strain hardening capability, the test result after necking is almost useless because it is impossible to interpret the test result quantitatively. In order to overcome this limitation, a new method that the summation of the strain at a given strain can transform to the displacement was designed, based on the measurement of the strain distribution along the gage length. The true stress-true strain curve was quantitatively calculated and established up to the amount of reduction of area using the previous concept. It was confirmed that this concept was valid and the work hardening occurred continuously up to 54% of strain, reduction of area, in the Zr-2.5%Nb alloy with the average grain size of 10 micrometers by heat treatment.

1. 서론

인장시험은 일축 인장 응력을 가하여 일정한 변위가 일어나도록 하는 과정으로 실시되며 이때 시험기에 감지되는 하중과 변위를 동시에 파악함으로써 하중과 변위의 관계를 파악하는 시험 방법이다. 인장시험에서 얻을 수 있는 자료는 일반적으로 강도, 연신률, 단면 수축률 등이며 최대 하중까지의 자료를 바탕으로 진변형-진응력 곡선을 구하거나 가공 경화 지수(n)를 구할 수도 있다. 이와 같이 인장시험은 매우 다양한 변형 관련 자료를 제공하므로 매우 유용한 시험법 중 하나이며 이들 자료는 설계 및 구조 해석, 파괴 특성의 해석에 사용된다.

인장 시험에서 최대 하중까지의 하중-변위 곡선으로부터 진응력-진변형 곡선을 도출할 수 있는 이유는 소성 변형 과정은 부피의 변화가 일어나지 않는 과정이라는 사실 때문이며, 물리적으로 가공 경화가 소성 변형에 의한 단면적 감소를 보상할 수 있는 한계를 나타내는 것이라고 할 수 있다. 그러므로 변위를 알면 길이 변형을 구할 수 있고 그로부터 시험편의 in situ 단면적을 알 수 있으므로 시험편에 가해지는 하중을 변형 당시의 단면적으로 나누어 진응력을 구할 수 있다.

그러나 최대 하중을 지나면 necking이 일어나 가공 경화가 더 이상의 단면적 감소를 극복할 수 없게 되고 변형이 necking 부위에 집중되므로 변형을 일으키기 위해 필요한 하중은 감소하게 된다. 이로 인해 길이 변형으로부터 시험편의 in situ 단면적을 구할 수 없으므로 진응력을 구할 수 없게 되는 것이다. 또한 인장시험에서 연신률이 약 20-30% 정도인 시험편이 약50% 정도의 단면 수축률을 나타내는 차이를 설명할 수 없는 등 인장 시험 결과를 활용하는데 한계가 있었다.

한편, 최대 하중을 지나도 부피가 일정하다는 사실과 인장 시험편 전반의 변형 분포를 이용하면 일축 인장시험으로부터 연신률과 단면 수축률 사이의 차이를 이해 할 수 있으며 단면 수축률에 해당하는 파단 변형까지의 진변형-진응력 사이의 관계를 구할 수 있어 이로써 인장시험 결과의 활용 여지를 넓힐 수 있을 것으로 판단된다.

2. 본론

인장 시험은 변위를 일정하게 증가시키며 그 조건을 만족시키기 위해 필요한 하중을 연속적으로 구함으로써 변형 거동을 파악하는 시험으로, 앞서 설명한 바와 같은 이유로 최대 하중을 지나면 변위의 증가에 따라 국부적인 단면의 감소가 나타나며 이로 인하여 하중의 감소가 나타난다. 파단 변형까지의 진응력-진변형 곡선을 구하는 방법은 서론에서 설명한 바와 같이 소성 변형 과정에서 부피가 변화하지 않는다는 가정하에 Fig. 1에 보인 바와 같이 구할 수 있다.

그러나 necking 이후에는 변형이 국부적으로 일어나지만 하중-변위 곡선은 crosshead의 변위만을 나타내어 necking에 의한 변형의 집중 현상을 제대로 반영할 수 없게 된다. 한편, necking이 일어나면 cross head 이동 속도는 일정하지만 변형이 국부적으로 제한되므로 변형 속도는 급격히 증가하게 되므로 단면적의 감소도 급격히 나타나고 삼축 응력 상태가 되므로 엄밀한 의미로는 변형 조건은 초기 인장시험과는 다르다고 할 수 있다.

따라서 necking 이후에 나타나는 국부적인 변형을 초기의 gage length와 연관시키기 위해서는 necking 부분에서 단면이 균일하다고 가정한다. 인장시험 과정에서 necking 부위의 형상을 세밀하게 조사하지는 않았지만 necking 부분에서 길이에 따라 단면적이 변화할 이유는 없으므로 이 가정은 타당하다고 할 수 있다.

Necking 부분에서의 변형이 하중-변위 곡선에서는 최대 하중 이후 파단까지의 변위로 나타나므로 시험편의 전반에 걸친 변형의 분포를 파악하고 이 변형이 나타나는 순서를 반영하면 그 시점의 시험편의 necking 부위의 단면적을 알 수 있으므로 진변형과 진응력을 알 수 있다.

다만, 시험편의 초기 단면적이 직사각형이고 시험이 끝난 시험편 전반에 걸친 단면적의 감소는 진변형(true strain)이고 시험편의 길이 변화는 공학적 변형(engineering strain)이라는 것을 반영해야 한다.

인장시험편의 변형은 시험편의 전체에 분포되어 있지만 시험이 끝난 후의 변형 분포를 고려하면 necking이 일어난 부위를 알 수 있으므로 변위의 증가를 초기의 gage length에 따라 계산한 변형보다는 엄청나게 큰 단면 수축률이 나타나는 현상을 잘 이해할 수 있다.

인장 시험편에 대한 변형 분포를 측정함으로써 진응력-진변형의 관계를 구하기 위하여 사용한 재료는 Zr-2.5%Nb 합금으로 제조된 CANDU 압력관 재료를 압연하여 판재 형태로 만든 인장 시험편으로 두께 약 3.7mm, 폭은 6mm, gege length는 약 25mm 정도의 판상 시험편이다. 본 연구에서 제시하는 결과는 횡 방향으로부터 30° 회전된 시험편으로 이 변형 특성은 길이나 횡 방향 시험편과는 다르다.

Fig. 2에는 인장시험이 끝난 시험편에 대하여 길이에 따른 시험편의 치수 변화를 나타내었으며, 시험편의 grip 부분을 포함하여 시험편의 gage length가 어느 정도까지는 균일하게 연신되었음을 알 수 있다.

Fig. 3에는 치수 변화로부터 계산한 폭과 두께 변형과 진변형(단면적의 감소)을 시험편의 길이에 따라 나타낸 것이다. 균일하게 연신된 구간에서는 재료의 이방성 때문에 변형이 약 2배 정도까지 차이가 나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 2에 나타낸 변형을 사용하여 시험편의 초기 길이로 변환하고 이를 파란색으로 나타낸 것이다. 파란색 곡선은 인장 시험이 끝난 시험편에서 시험편의 길이에 따라 어떻게 변형이 분포하고 있는 지를 보여 주는 것으로 necking은 시험편의 왼쪽 fillet로부터 14mm에서 26mm 사이에서 일어났다는 것을 보여 주고 있다.
즉, Fig. 3은 균일하게 연신된 변형은 약 10% 정도이고, 최대 하중 이후에는 변형이 약 12mm 정도의 범위에 집중되었으며 이 과정에서 하중이 감소하다가 파단에 이르는 것이므로 이 부분의 변형이 하중-변위 곡선의 최대하중 이후의 변형 거동을 나타내는 것이다.

앞서 가정한 바와 같이 necking 지역에서 일정한 단면적을 가지면서 변형이 일어나면 이 변형의 총합 (부피의 총 변화)이 하중-변위 곡선에 표시되므로 necking 부위에서의 변형의 적분이 변위로 나타나며 앞서 가정한 바와 같이 necking 부위의 단면적이 균일하다면 이로부터 진응력을 구할 수 있게 되는 것이다.

Necking이 한번 발생하면 기하학적인 변화에 의해 단면적이 감소하고 이로

인해응력집중이 발생하므로 necking 부위는 균일하게 연신된 시험편 쪽은 변형이 어려워지고 변형은 점점 necking 지역의 가운데로 집중되어 necking region의 모양은 taper를 가지게 되고, 결국에는 파괴된다.

이 관계를 Fig. 5와 6을 사용하여 상세히 설명할 수 있다. Fig. 5에는 최대 하중인 A와 시험편의 파단이 일어나는 B를 나타내었다. Fig. 6은 Fig. 5에 나타낸 응력-변형 곡선과 함께 시험편의 길이에 따른 변형의 분포를 나타내었다. 파란색의 변형 분포에서 균일하게 변형된 부분까지 인장되면 최대 하중에 도달하게 되고 이 이후 계속 변형되어 녹색으로 표시된 곳까지 변형되면 시험편은 파단된다. 이와 같이 시험편의 길이에 따른 변형의 합은 하중-변위 곡선에서 변위로만 나타나며, 최대 하중을 지나 necking이 일어나는 부분의 변형 분포는 시험편을 따른 변형의 profile 관측을 통해서 잘 이해할 수 있다.

Fig. 7은 위에서 설명한 방법으로 구한 파단 변형까지의 진응력-진변형 곡선과 공학적인 응력-변형 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 진응력-진변형 곡선은 단면수축률에 해당하는 54%까지 변형에 대하여 확장되었으며, 변형의 증가에 따라 가공 경화가 일어나는 것을 알 수 있다.

이와 같이 necking이 일어난 후의 변형 거동은 균일하게 일어나는 변형을 초과하는 변형 구간에서의 강화 효과를 나타내는 것이라고 할 수 있다. 왜냐하면 단면 수축률이 크면서 하중이 작게 감소하는 경우에는 진응력을 상당히 높아지게 되어 큰 강화를 일으킬 것이기 때문이다.

3. 결론

인장 시험편의 변형 분포 측정과 변형 중 necking 부위에서 길이에 따른 단면적이 같다는 가정을 이용하여 파단 변형까지 진응력-진변형 곡선을 구하는 것이 가능하다. 이를 바탕으로 하중-변위 곡선에서 최대 하중까지의 결과만을 주로 사용할 수 밖에 없었던 한계를 극복하고 파단 변형까지의 가공 경화 거동을 파악함으로써 인장 시험으로부터 얻는 변형 거동의 응용 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업중 중수로압력관 건전성 평가 기술 개발 과제에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. G. E. Dieter, ‘mechanical metallurgy’, 3rd ed. McGraw-Hill Book Company, 1986, pp. 283-289.
2. 이동녕, 김정수, 이성근, ‘변형 및 파괴 역학’, 제3판, 1990, pp. 1-20.

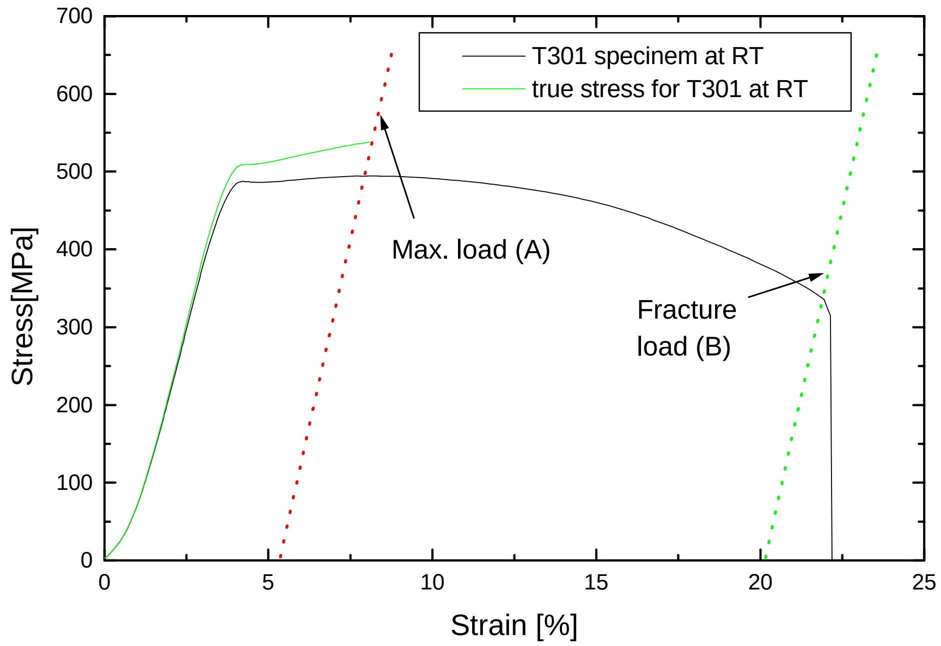

Fig. 1. Engineering and True strain-stress curves in 30° tilt tensile specimen from the transverse direction at RT.

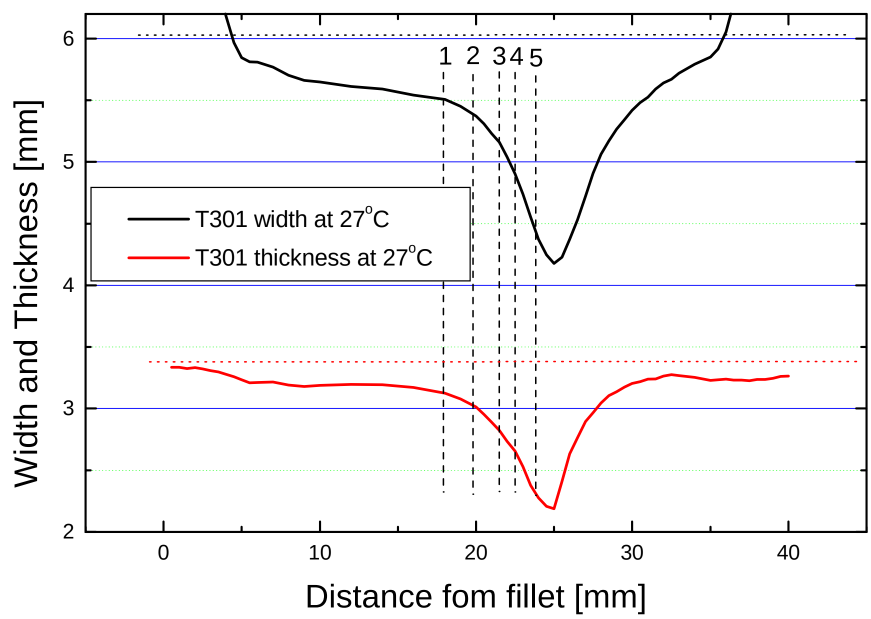

Fig. 2. Width and thickness variation along the length of the broken specimen at RT in 30° tilt tensile specimen from the transverse direction

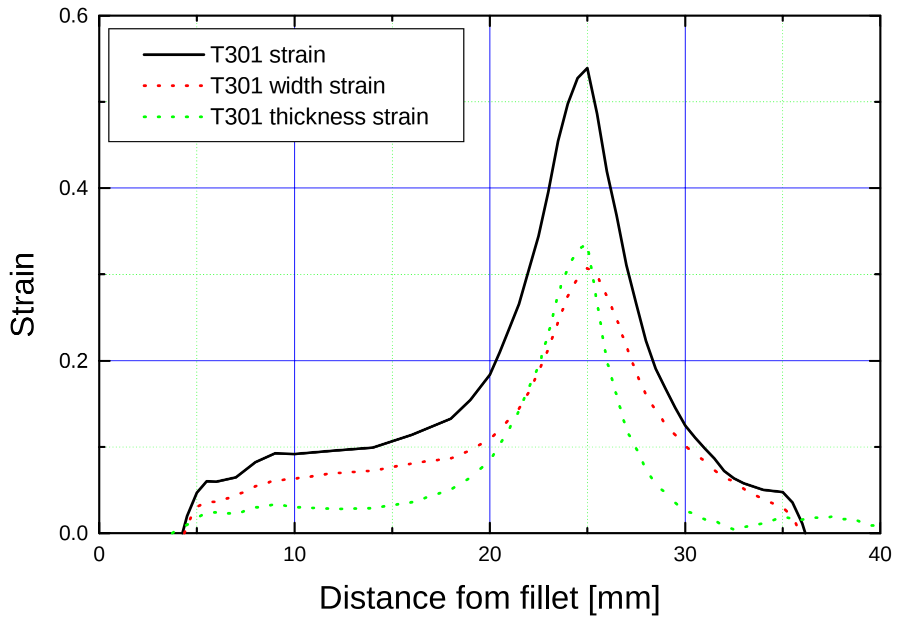

Fig. 3. Strain distribution of width and thickness along the length of the broken specimen at RT in 30° tilt tensile specimen from the transverse direction (black line, red dotted line, and green dotted line denote the total strain, the strain in width and in thickness, respectively.)

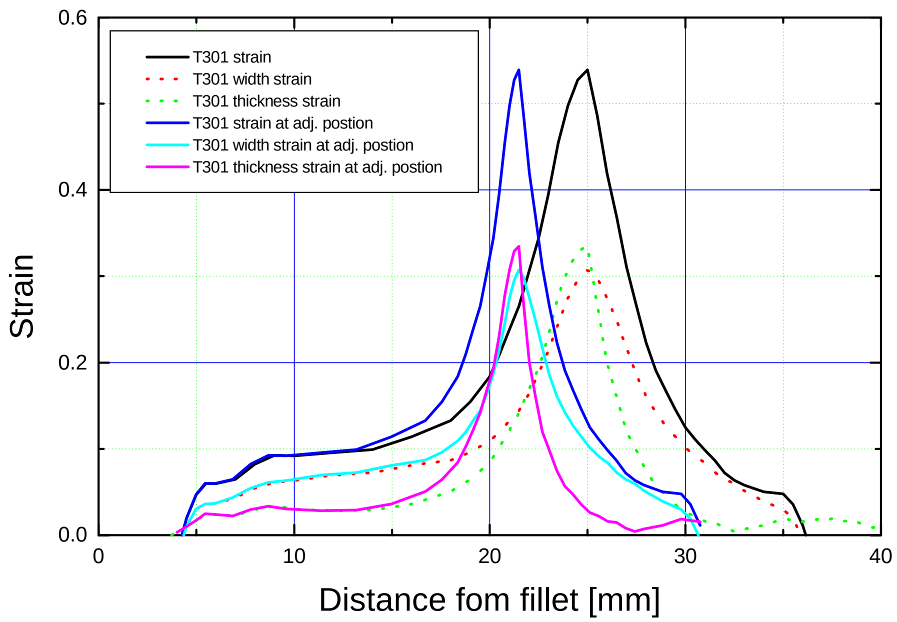

Fig. 4. Strain distribution of width and thickness along the length of the broken specimen at RT in 30° tilt tensile specimen from the transverse direction (blue line, cyan line, and magenta line denote the total strain, the strain in width and in thickness, respectively.)

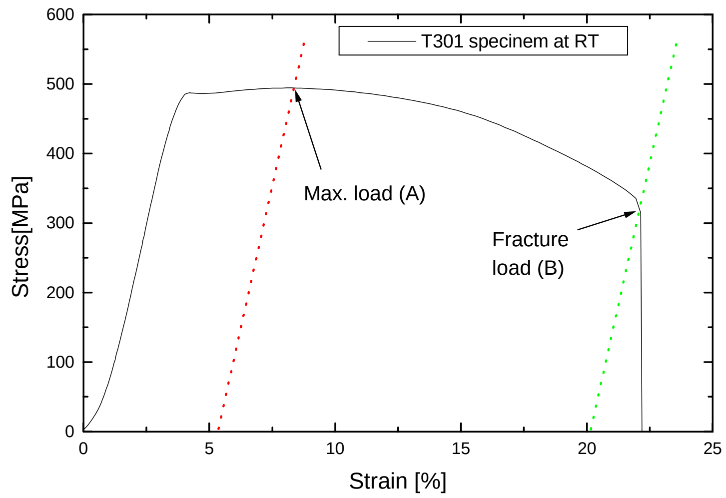

Fig. 5. Engineering strain-stress curve in the 30°-tilt specimen from the transverse direction at RT.

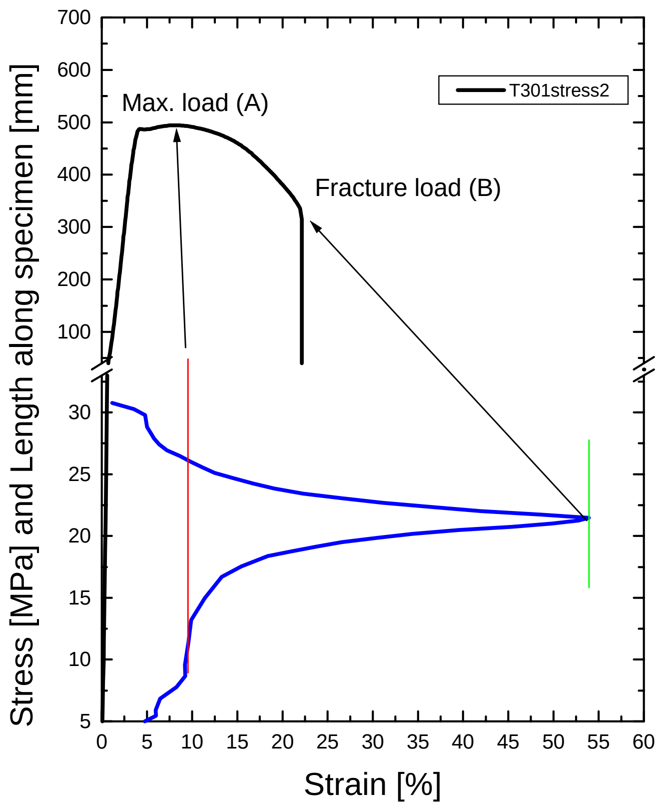

Fig. 6. Schematic illustration of the relationship between the strain in the strain stress curve and the accumulation of the strain along the gage length of the tensile specimen.

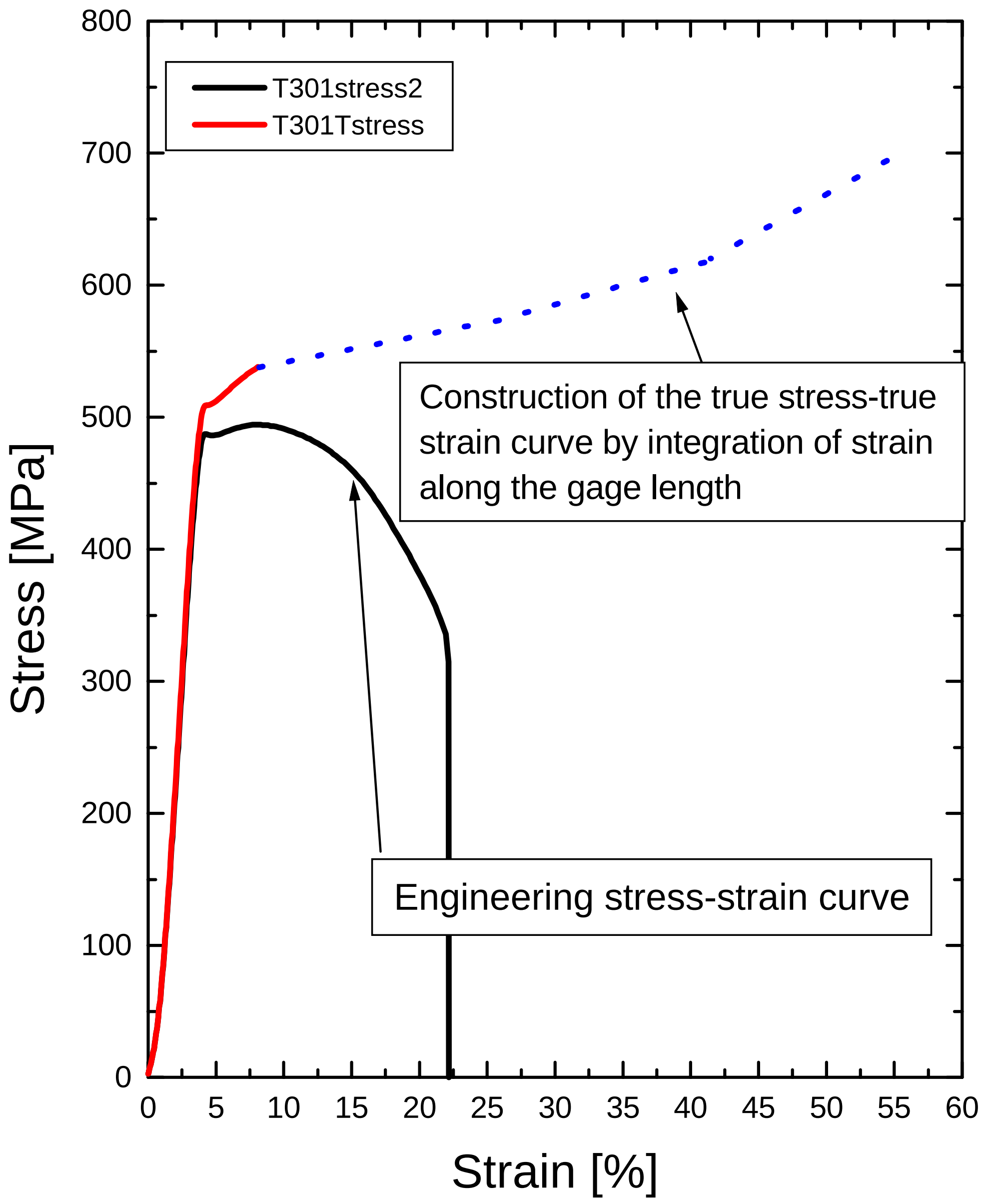

Fig. 7. True strain-true stress curve for the 30°-tilt tensile specimen from the transverse direction at RT.