(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0018061
(43) 공개일자 2016년02월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
*G06F 19/00* (2011.01)
(21) 출원번호 10-2014-0101989
(22) 출원일자 2014년08월07일
심사청구일자 2014년08월07일

(71) 출원인
**울산과학기술원 산학협력단**
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
**김주영**
울산광역시 울주군 범서읍 구영로 75-9, 308동 302호
**김영천**
전라북도 익산시 선화로 100-12, 405동 608호
(74) 대리인
**이학수**

전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 **구성 방정식 선정 방법**

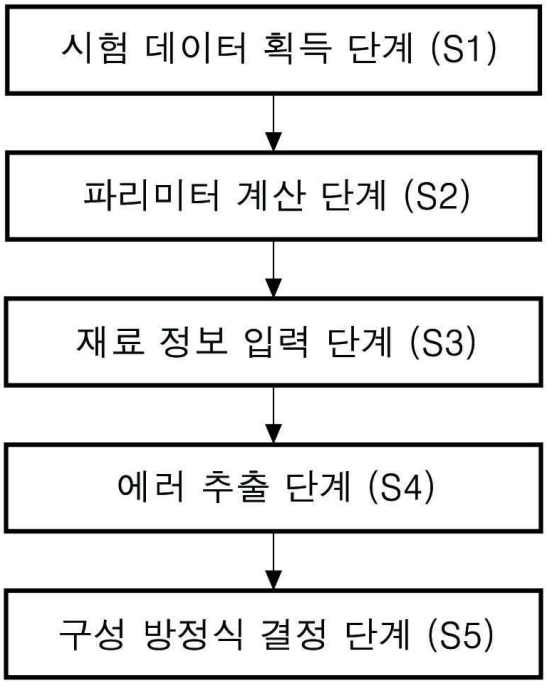
## (57) 요 약

본 발명은 금속 재료에 대한 간단한 정보만으로 가장 적합한 구성 방정식을 제안하는 구성 방정식 선정 방법을 제공하는 것을 그 목적으로 한다.

상기의 목적 달성을 위하여 본 발명은, 금속 합금의 기계적인 거동을 나타내는 구성 방정식을 단말기를 통하여

(뒷면에 계속)

*대 표 도* - 도1



선정하기 위한 구성 방정식 선정 방법에 있어서, 다수의 재료를 이용하여 인장 시험을 통하여 응력과 변형률의 데이터를 획득하는 단말기에 저장하는 시험데이터 획득 단계; 상기 획득된 실제 응력과 변형률 데이터를 이용하여 상기 단말기를 통하여 구성 방정식의 파라미터를 계산하여 저장하는 파라미터 계산 단계; 상기 단말기를 통하여 재료의 명칭을 저장하는 재료 정보 입력 단계; 상기 단말기를 통하여 상기 입력된 재료에 해당하는 허용 강도 및 극한 강도의 에러를 추출하는 에러 추출 단계; 및 상기 단계에서 추출된 에러 중 가장 낮은 에러를 나타내는 구성 방정식을 상기 단말기로 출력하는 구성 방정식 결정 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 9991002433
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 신진연구지원사업
연구과제명 나노포러스 금 박막의 기계적 물성 향상
기 여 율 1/1
주관기관 울산과학기술대학교 산학협력단
연구기간 2013.09.01 ~ 2014.08.31

## *특허청구의 범위*

**청구항 1**

금속 합금의 기계적인 거동을 나타내는 구성 방정식을 단말기를 통하여 선정하기 위한 구성 방정식 선정 방법에 있어서,

다수의 재료를 이용하여 인장 시험을 통하여 응력과 변형률의 데이터를 획득하는 단말기에 저장하는 시험데이터 획득 단계;

상기 획득된 실제 응력과 변형률 데이터를 이용하여 상기 단말기를 통하여 구성 방정식의 파라미터를 계산하여 저장하는 파라미터 계산 단계;

상기 단말기를 통하여 재료의 명칭을 저장하는 재료 정보 입력 단계;

상기 단말기를 통하여 상기 입력된 재료에 해당하는 허용 강도 및 극한 강도의 에러를 추출하는 에러 추출 단계; 및

상기 단계에서 추출된 에러 중 가장 낮은 에러를 나타내는 구성 방정식을 상기 단말기로 출력하는 구성 방정식 결정 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

**청구항 2**

청구항 1에 있어서, 상기 단말기는 컴퓨터 또는 스마트폰인 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

**청구항 3**

청구항 2에 있어서, 상기 구성 방정식은 Hollomon, Swift 및 Voce 구성 방정식인 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

**청구항 4**

청구항 3에 있어서, 상기 Hollomon 구성 방정식의 파라미터는 n, K, $\sigma_y$, $\sigma_u$이며, Swift 구성 방정식의 파라미터는 $K_s$, $\varepsilon$, ns, $\varepsilon_y$, $\sigma_u$이며, Voce 구성 방정식의 $\sigma_0$, $\sigma_0 A$, $\beta$, $\sigma_y$, $\sigma_u$인 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

**청구항 5**

청구항 4에 있어서, 상기 구성 방정식의 파라미터는 시험데이터 획득 단계에서 획득되 실제 허용 응력과 각 구성 방정식에 의하여 계산된 허용 응력의 차이와 실제 극한 응력값과 각 구성 방정식에 의하여 계산된 극한 응력의 차이를 나타내는 에러를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

**청구항 6**

청구항 5에 있어서, 상기 구성 방정식 결정 단계에서는 구성 방정식의 파라미터를 추가하여 출력하는 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

**청구항 7**

청구항 1에 있어서, 상기 데이터 획득 단계에서는 각 재료의 탄성 계수를 추가하여 획득하는 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

**청구항 8**

청구항 7에 있어서, 상기 구성 방정식 결정 단계에서는 재료의 탄성 계수도 추가하여 출력하는 것을 특징으로 하는 구성 방정식 선정 방법.

# 명 세 서

## 기 술 분 야

[0001] 본 발명은 구성 방정식 선정 방법에 관한 것으로 더욱 상세하게는 특정 합금에 가장 적합한 구성 방정식을 선정하는 구성 방정식 선정 방법에 관한 것이다.

## 배 경 기 술

[0002] 금속 또는 금속합금은 인장시험을 통하여 항복 강도와 극한 강도를 계산하여 해당 금속의 기계적인 특성을 표현한다.

[0003] 항복 강도는 소성 변형이 발생하는 지점의 응력을 나타내고, 극한 강도는 해당 재료가 견딜 수 있는 최대 응력을 의미한다.

[0004] 특히 소성 이후 파단까지는 응력과 변형률의 관계가 비선형 관계이며, 재료적 특성에 따라 다른 양상을 나타내어 특정 재료에 따라 다른 구성 방정식 수립하여 사용한다.

[0005] 예를 들면, 등록특허 제643193호에는 압입 공정 중 오스테나이드 계열의 스테인레스강의 기계적인 특성을 결정하기 위한 구성이 개시되어 있다. 상기 발명은 연속압입시험을 이용한 선형적인 가공경화현상을 갖는재료의 가상의 가공경화지수, 응력계수,항복 강도 및 인장강도를 결정하는 방법을 제안하고 있어, 압입 공정에서 사용될 수 있는 스테인리스강만 적용할 수 있는 한계가 있다.

[0006] 한편, 일반적인 합금 항복 강도와 극한 강도 사이의 재료적인 특성은 구성 방정식을 통하여 묘사하며, 대표적인으로 Hollomon 방정식을 들 수 있다.

[0007] 상기 Hollomon 방정식은 $\sigma=K\varepsilon^{n}$으로 표현되며, 여기서 $\sigma$는 응력을, $\varepsilon$는 변형률, K는 강도계수, n는 가공경화지수를 각각 의미한다.

[0008] 이때 극한 강도 $\sigma u$는 $Kn^{n}$으로 표현된다.

[0009] 상기 Hollomon 방정식은 비교적 단순한 장점이 있으나, 소성 가공 경화의 영향을 고려하지 않는 단점이 있어, 소성 가공 경화의 특성을 반영한 Swift와 Voce 방정식이 제안되었다.

[0010] 상기 Swift 방정식은 $\sigma=K_s(\varepsilon+\varepsilon_0)^{ns}$로 표현되며, 여기서 Ks, $\varepsilon_0$, ns는 Swift 방정식의 상수를 의미한다.

[0011] 그리고 Voice 방정식은 $\sigma=\sigma_0-A\sigma_0\exp(-\beta\varepsilon)$로 표현되며, 여기서 $\sigma_0$, A, $\beta$는 역시 Voice 방정식의 상수를 의미한다.

[0012] 상기의 3개의 구성 방정식은 재료의 성질에 따라 그 정확도가 달리 표현된다. 예를 들어 소성 가공 경화 특성이 높은 재료의 경우에는 Swift 방정식 또는 Voice 방정식을 적용하는 것이 적절하나, 상기의 특성이 약한 경우에는 가장 간단한 형태인 Hollomon 방정식을 적용하는 것이 가장 바람직하다.

[0013] 그러나 재료의 특성이 기계적 거동이 파악되지 않은 경우 어떠한 구성 방정식이 가장 적합한지 알 수 없으므로, 별도의 문헌 이나 연구보고서 등을 통하여 파악한 후, 적절한 구성 방정식을 선정하므로, 다소 시간이 소비되고 또한 비전문가의 경우에는 더욱더 많은 시간이 소용된다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0014] 본 발명은 상기와 같은 단점을 극복하기 위하여 안출된 것으로, 금속 재료에 대한 간단한 정보만으로 가장 적합한 구성 방정식을 제안하는 구성 방정식 선정 방법을 제공하는 것을 그 목적으로 한다.

### 과제의 해결 수단

[0015] 상기의 목적 달성을 위하여 본 발명은, 금속 합금의 기계적인 거동을 나타내는 구성 방정식을 단말기를 통하여 선정하기 위한 구성 방정식 선정 방법에 있어서, 다수의 재료를 이용하여 인장 시험을 통하여 응력과 변형률의 데이터를 획득하는 단말기에 저장하는 시험데이터 획득 단계; 상기 획득된 실제 응력과 변형률 데이터를 이용하여 상기 단말기를 통하여 구성 방정식의 파라미터를 계산하여 저장하는 파라미터 계산 단계; 상기 단말기를 통하여 재료의 명칭을 저장하는 재료 정보 입력 단계; 상기 단말기를 통하여 상기 입력된 재료에 해당하는 허용 강도 및 극한 강도의 에러를 추출하는 에러 추출 단계; 및 상기 단계에서 추출된 에러 중 가장 낮은 에러를 나타내는 구성 방정식을 상기 단말기로 출력하는 구성 방정식 결정 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0016] 바람직하게는, 상기 단말기는 컴퓨터 또는 스마트폰인 것을 특징으로 한다.

[0017] 더욱 바람직하게는, 상기 구성 방정식은 Hollomon, Swift 및 Voce 구성 방정식인 것을 특징으로 한다.

[0018] 더욱 바람직하게는, 상기 Hollomon 구성 방정식의 파라미터는 n, K, $\sigma_y$, $\sigma_u$이며, Swift 구성 방정식의 파라미터는 $K_s$, $\varepsilon$, ns, $\varepsilon_y$, $\sigma_u$이며, Voce 구성 방정식의 $\sigma_0$, $\sigma_0 A$, $\beta$, $\sigma_y$, $\sigma_u$인 것을 특징으로 한다.

[0019] 더욱 바람직하게는, 상기 구성 방정식의 파라미터는 시험데이터 획득 단계에서 획득되 실제 허용 응력과 각 구성 방정식에 의하여 계산된 허용 응력의 차이와 실제 극한 응력값과 각 구성 방정식에 의하여 계산된 극한 응력의 차이를 나타내는 에러를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0020] 더욱 바람직하게는, 상기 구성 방정식 결정 단계에서는 구성 방정식의 파라미터를 추가하여 출력하는 것을 특징으로 한다.

[0021] 바람직하게는 상기 데이터 획득 단계에서는 각 재료의 탄성 계수를 추가하여 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0022] 더욱 바람직하게는, 상기 구성 방정식 결정 단계에서는 재료의 탄성 계수도 추가하여 출력하는 것을 특징으로 한다.

### 발명의 효과

[0023] 본 발명에 따른 구성 방정식 선정 방법은 사전에 다수의 금속합금들을 재료 시험의 통하여 실제 거동을 시험한 후, 시험된 결과들은 3개의 구성 방정식의 계수를 산정하고, 사용자가 입력하는 재료 정보를 기초로 가장 적합한 구성 방정식을 제안하는 것을 특징으로 하므로, 간단한 방법에 의하여 정확한 재료의 거동을 산정할 수 있는 효과가 있다.

### 도면의 간단한 설명

[0024] 도 1은 본 발명에 따른 구성 방정식 선정 방법의 절차도이며,

도 2는 본 발명의 실시예에 따라 측정된 재료의 특성을 나타내는 표이며,

도 3은 본 발명의 실시예에 따라 산출된 Hollomon 구성 방정식의 파라미터 표이며,

도 4는 본 발명의 실시예에 따라 산출된 Swift 구성 방정식의 파라미터 표이며,

도 5는 본 발명의 실시예에 따라 산출된 Voce 구성 방정식의 파라미터 표이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 이하 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 첨부한 도면을 참조하여 구체적으로 설명한다.

[0026] 본 발명에 따른 구성 방정식 선정 방법은 도 1에 도시된 바와 같이, 시험데이터 획득 단계(S1), 파라미터 계산 단계(S2), 재료 정보 입력 단계(S3), 에러 추출 단계(S4) 및 구성 방정식 결정 단계(S5)를 포함하여 구성되며,

상기 방법은 단말기를 통하여 수행되며, 상기 단말기는 컴퓨터 또는 스마트폰이다.

[0027] 즉, 본 발명에 따른 구성 방정식 선정 방법은 컴퓨터 또는 스마트폰에 적용되는 어플리케이션 형태로 구현되며, 상기 어플리케이션은 필요한 경우 사전 데이터 저장을 위한 데이터베이스를 포함하여 구성된다.

[0028] 이하 각 단계를 구체적으로 설명한다.

[0029] **시험 데이터 획득 단계(S1)**

[0030] 시험 데이터 획득 단계(S1)는 각 금속 종류별 시편을 인장시험기를 이용하여 시험을 수행한 결과값을 획득하는 단계이다.

[0031] 이때 시험편은 동일한 크기로 제작하는 것이 바람직하다. 예를 들면, 게이지 길이는 25mm이며 직경은 6mm로 제작하여 시험한다.

[0032] 본 발명은 일실시예로, SKH51, SK4, SCM21, SCM4, API X100, API X120 (carbon steels), STS403, STS410, STS420J2, STS440 (ferrite-based stainless steels), STS303, STS304, STS304L, STS310S, STS316, STS316L, STS321, STS347 (austenite-based stainless steels), Inconel 600, Inconel 825 (Ni alloys), Ti.5Al.2.5Sn, Ti.6Al.4V, Ti.6Al.6V.2Sn, Ti.7Al.4Mo (Ti alloys), Al2024, Al6061 및 Al7075 (Al alloys) 전체 27개의 금속 합금 재질을 시험하였다.

[0033] 이때, 사용된 재료 시험기는 Instron 5582 (Instron Inc. USA)로 헤드 속도 1mm/min로 수행하였으며, 순 응력과 변형률은 OriginPro 7.5 SRO(OriginLab Co., MA)을 이용하여 분석하였다.

[0034] 상기의 결과 27개 금속합금에 대한 응력 변형률 결과를 획득하였으며, 획득된 결과는 별도의 데이터베이스에 수록하였다.

[0035] **파라미터 계산 단계(S2)**

[0036] 파라미터 계산 단계(S2)에서는 상기 시험 데이터 획득 단계(S1)를 통하여 획득된 실제 시편 시험 결과를 기초로 하여 3개의 구성 방정식의 파라미터와 시편의 탄성 계수, 항복 변형률, 항복 강도, 극한 변형률 및 극한 강도를 산출하는 단계이다.

[0037] 이때 탄성 계수는 초기 재료의 선형 구간을 근거로 산정하고, 나머지 항목들은 상기 응력 변형률 결과의 그래프와 대비하여 산출한다.

[0038] 구성 방정식의 파라미터는 Hollomon 구성 방정식의 n, K, $\sigma_y$, $\sigma_u$이며, Swift 구성 방정식의 $K_s$, $\varepsilon$, ns, $\varepsilon_y$, $\sigma_u$이며, 마지막으로 Voce 구성 방정식의 $\sigma_0$, $\sigma_0 A$, $\beta$, $\sigma_y$, $\sigma_u$이다.

[0039] 그리고 추가적으로 허용 강도의 에러율, 극한 강도의 에러율을 산출한다.

[0040] 상기의 파라미터는 시험 데이터 획득 단계(S1)를 통하여 획득한 각 재료의 실제 응력 변형률 데이터를 이용하여 산정할 수 있으며, 특허 에러율은 실제 허용 강도와 극한 강도 값과 비교하여 차이값을 백분율로 표현한 값이다.

[0041] 상기 실시예인 27개의 금속 재료에 대한 탄성 계수, 항복 변형률, 항복 강도, 항복 강도, 극한 변형률은 도 2에 도시하였으며, Hollomon 구성 방정식의 파라미터는 도 3, Swift 구성 방정식의 파라미터는 도 4, 마지막으로 Voce 구성 방정식의 파라미터는 도 5에 각각 도시하였다.

[0042] 한편, 상기 27개의 금속 재료 이외의 금속도 시험 데이터 획득 단계(S1)를 통하여 변형률 응력 데이터를 추출하는 경우 구성 방정식의 파라미터를 선정할 수 있다.

[0043] 실제 시험 데이터를 이용하여 구성 방정식을 도출할 경우 초음파 측정법을 이용하여 측정한 탄성계수를 이용하여 탄성구간의 기울기를 정의하고, 이 탄성계수를 0.2% offset 한 직선과 진응력-진변형률 곡선과의 교점으로 항복강도($s_y$)를 구하게 된다. 극한 강도($s_u$)는 공칭응력-공칭변형률 그래프에서 최대값이 되는 지점의 값을 진응력-진변형률 곡선에서의 값으로 치환하여 구한다. 이때 항복강도와 극한강도의 사이구간을 소성변형 구간이라

하며, 이 구간을 구상 방정식을 이용하여 수식화 하여 파라미터 들을 도출하게 된다.

[0044] 소성구간에서 수식을 이용하여 도출한 구상방정식이 실제 시험으로 얻은 값과 얼마나 정확한지를 표현하는 적합성을 결정계수 (coefficent of determination R)로 얻어 도 2, 3, 4에 추가로 첨부하였다.

[0045] **재료 정보 입력 단계(S3)**

[0046] 상기 시험데이터 획득 단계(S1)와 파라미터 계산 단계(S2)는 사전 준비 단계에 해당된다. 즉, 사전에 선택된 금속 재료의 거동을 시험한 후, 해당 재료의 3가지 구성 방정식을 산정하고, 산정된 구성 방정식의 파라미터는 데이터 베이스로 저장하는 단계이다.

[0047] 상기 재료 정보 입력 단계(S3)는 사용자가 해당 재료의 정보를 입력하는 단계로 컴퓨터 프로그램 또는 스마트폰용 어플리케이션에서 구동된다.

[0048] 여기서 사용자가 입력하는 정보는 재료명으로 입력된 재료명은 별도로 저장된다.

[0049] **에러 추출 단계(S4)**

[0050] 상기 재료 정보 입력 단계(S3)를 통하여 입력된 재료명과 사전에 저장된 파라미터 정보와 대비하여 에러를 추출하는 에러 추출 단계(S4)가 수행된다.

[0051] 본 단계에서는 사전에 준비된 파라미터 정보에 해당 재료의 에러를 각 구성방정식 별로 추출한다.

[0052] 이때 추출되는 에러는 허용 강도 에러, 극한 강도 에러로 전체 6개의 정보가 추출된다.

[0053] **구성 방정식 결정 단계(S5)**

[0054] 상기 에러 추출 단계(S4)를 통하여 추출된 6개의 에러를 기초로 하여, 가장 허용 강도 에러가 가장 낮은 구성방정식과 극한 강도 에러가 가장 낮은 구성 방정식을 각각 결정한다.

[0055] 즉, 입력된 재료를 기초로 2개의 구성 방정식을 제안하며, 상기 2개의 구성 방정식을 동일한 구성 방정식일 수도 있다.

[0056] 그리고 해당 구성 방정식의 파라미터도 동시에 제안한다.

[0057] 시스템으로 구축 시에는 화면에 해당 구성 방정식의 종류와 각 구성 방정식의 파라미터를 화면에 출력하여 전체 절차를 완료한다.

[0058] 본 발명에 따른 본 발명에 따른 구성 방정식 선정 방법은 실시예로 27개의 재료의 파라미터 값을 제시하였으나, 필요한 경우 새로운 재료의 시험 결과를 수록하면, 추가적으로 새로운 재료의 구성 방정식도 제안되므로, 다양한 재료의 상태를 확인할 수 있는 장점이 있다.

[0059] 또한 상기 방법은 컴퓨터 프로그램 또는 스마트폰용 어플리케이션으로 구현하는 경우 간단한 재료의 입력만으로 해당 재료에 가장 적합한 구성 방정식과 구성 방정식의 파라미터 값을 확인할 수 있는 장점이 있다.

[0060] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

## *부호의 설명*

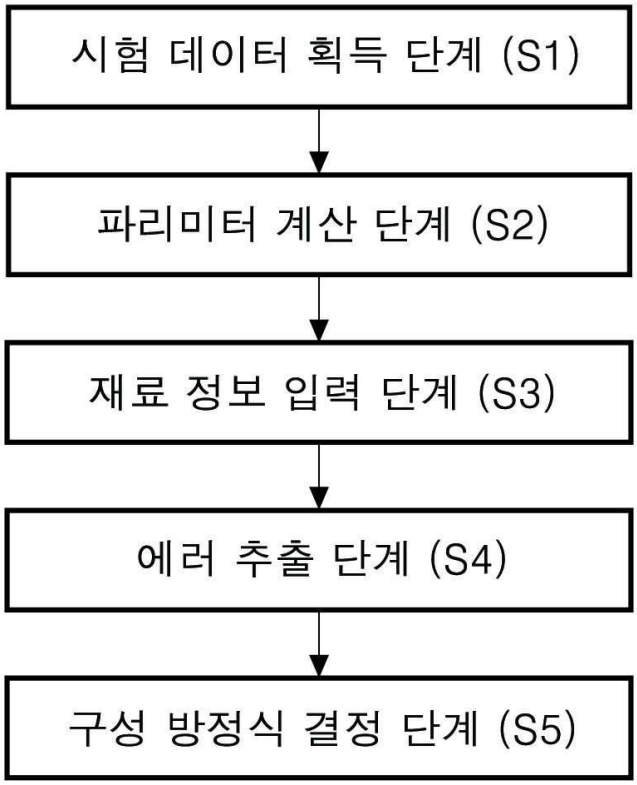
[0061] S1: 시험데이터 획득 단계 S2: 파라미터 계산 단계

S3: 재료 정보 입력 단계 S4: 에러 추출 단계

S5: 구성 방정식 결정 단계

도면

도면1




도면2

| Sample | Elastic modulus (GPa) | Yield | | Ultimate tensile | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Strain | Stress (MPa) | Strain | Stress (MPa) |
| SKH51 (tempered) | 223 | 0.0033 | 280 | 0.1181 | 785 |
| SK4 (tempered) | 204 | 0.0040 | 409 | 0.1638 | 750 |
| SCM21 (tempered) | 194 | 0.0034 | 275 | 0.1476 | 649 |
| SCM4 (tempered) | 177 | 0.0060 | 716 | 0.0667 | 999 |
| API X100 | 203 | 0.0049 | 592 | 0.0891 | 913 |
| API X120 | 210 | 0.0057 | 749 | 0.0532 | 1025 |
| STS403 (tempered) | 211 | 0.0036 | 330 | 0.1563 | 674 |
| STS410 (tempered) | 215 | 0.0037 | 357 | 0.1521 | 672 |
| STS420J2 (tempered) | 211 | 0.0038 | 392 | 0.1305 | 806 |
| STS440 (annealed) | 220 | 0.0035 | 323 | 0.1167 | 817 |
| STS303 (annealed) | 206 | 0.0036 | 314 | 0.4822 | 1082 |
| STS304 (annealed) | 190 | 0.0036 | 311 | 0.5374 | 1163 |
| STS304L (annealed) | 203 | 0.0037 | 338 | 0.4900 | 1116 |
| STS310S (annealed) | 192 | 0.0034 | 258 | 0.3468 | 780 |
| STS316 (annealed) | 198 | 0.0034 | 282 | 0.5014 | 1061 |
| STS316L (annealed) | 198 | 0.0035 | 305 | 0.4524 | 949 |
| STS321 (annealed) | 197 | 0.0036 | 305 | 0.4512 | 911 |
| STS347 (solid solution heat treatment) | 200 | 0.0031 | 211 | 0.4169 | 884 |
| Inconel 600 (annealed) | 170 | 0.0044 | 405 | 0.2715 | 985 |
| Inconel 825 (annealed) | 161 | 0.0041 | 341 | 0.3097 | 984 |
| Ti–5Al–2.5Sn (solution treatment) | 130 | 0.0086 | 863 | 0.0903 | 1029 |
| Ti–6Al–4V (solution treatment) | 110 | 0.0104 | 930 | 0.0858 | 1097 |
| Ti–6Al–6V–2Sn (solution treatment) | 122 | 0.0102 | 998 | 0.1070 | 1174 |
| Ti–7Al–4Mo (solution treatment) | 132 | 0.0098 | 1031 | 0.0802 | 1134 |
| Al2024 (tempered) | 72 | 0.0084 | 461 | 0.1283 | 670 |
| Al6061 (tempered) | 70 | 0.0057 | 259 | 0.0508 | 298 |
| Al7075 (tempered) | 71 | 0.0094 | 524 | 0.0828 | 626 |

도면3

| Sample | Hollomon | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | n | K | $\sigma_y$ (MPa) | Error (%) | $\sigma_u$ (MPa) | Error (%) | R |
| SKH51 | 0.2586 | 1458 | 339 | 21 | 1027 | 31 | 0.9694 |
| SK4 | 0.1797 | 1043 | 383 | -6 | 766 | 2 | 0.9986 |
| SCM21 | 0.2224 | 1029 | 294 | 7 | 737 | 14 | 0.9935 |
| SCM4 | 0.1296 | 1435 | 743 | 4 | 1101 | 10 | 0.9942 |
| API X100 | 0.1415 | 1303 | 615 | 4 | 989 | 8 | 0.9942 |
| API X120 | 0.1299 | 1532 | 786 | 5 | 1175 | 15 | 0.9745 |
| STS403 | 0.2124 | 1010 | 303 | -8 | 727 | 8 | 0.9942 |
| STS410 | 0.1786 | 936 | 343 | -4 | 688 | 2 | 0.9952 |
| STS420J2 | 0.2073 | 1261 | 400 | 2 | 910 | 13 | 0.9949 |
| STS440 | 0.2565 | 1508 | 357 | 11 | 1064 | 30 | 0.9760 |
| STS303 | 0.3271 | 1256 | 187 | -40 | 871 | -19 | 0.9718 |
| STS304 | 0.3482 | 1303 | 170 | -45 | 903 | -22 | 0.9721 |
| STS304L | 0.32 | 1304 | 202 | -40 | 905 | -19 | 0.9791 |
| STS310S | 0.2939 | 1014 | 183 | -29 | 707 | -9 | 0.9794 |
| STS316 | 0.3459 | 1241 | 161 | -43 | 859 | -19 | 0.9805 |
| STS316L | 0.3086 | 1124 | 186 | -39 | 782 | -18 | 0.9774 |
| STS321 | 0.2923 | 1063 | 193 | -37 | 742 | -19 | 0.9664 |
| STS347 | 0.3653 | 1137 | 130 | -38 | 787 | -11 | 0.9875 |
| Inconel 600 | 0.2654 | 1331 | 303 | -25 | 936 | -5 | 0.9786 |
| Inconel 825 | 0.309 | 1318 | 226 | -34 | 917 | -7 | 0.9758 |
| Ti-5Al-2.5Sn | 0.0662 | 1202 | 882 | 2 | 1004 | -2 | 0.9892 |
| Ti-6Al-4V | 0.0802 | 1336 | 930 | 0 | 1092 | -1 | 0.9984 |
| Ti-6Al-6V-2Sn | 0.076 | 1379 | 970 | -3 | 1134 | -3 | 0.9769 |
| Ti-7Al-4Mo | 0.0548 | 1291 | 1003 | -3 | 1101 | -3 | 0.9501 |
| Al2024 | 0.1503 | 907 | 439 | -5 | 682 | 2 | 0.9931 |
| Al6061 | 0.0625 | 361 | 262 | 1 | 304 | 2 | 0.9951 |
| Al7075 | 0.0804 | 757 | 524 | 0 | 618 | -1 | 0.9952 |

도면4

| Sample | Swift | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K_s$ | e | $n_s$ | $\varepsilon_y$ (MPa) | Error (%) | $\sigma_u$ (MPa) | Error (%) | R |
| SKH51 | 1249 | -0.0032 | 0.1997 | - | - | 906 | 15 | 0.9980 |
| SK4 | 1064 | 0.0016 | 0.1893 | 398 | -3 | 777 | 4 | 0.9992 |
| SCM21 | 961 | -0.002 | 0.1928 | 269 | -2 | 700 | 8 | 0.9979 |
| SCM4 | 1348 | -0.0032 | 0.1075 | 718 | 0 | 1061 | 6 | 0.9990 |
| API X100 | 1236 | -0.0026 | 0.1191 | 603 | 2 | 960 | 5 | 0.9993 |
| API X120 | 1332 | -0.0046 | 0.0857 | 741 | -1 | 1079 | 5 | 0.9988 |
| STS403 | 763 | -0.0039 | 0.1112 | - | - | 597 | -11 | 0.9958 |
| STS410 | 986 | 0.0036 | 0.2026 | - | - | 713 | 6 | 0.9983 |
| STS420J2 | 1219 | -0.0012 | 0.1938 | 386 | -1 | 887 | 10 | 0.9957 |
| STS440 | 1303 | -0.0033 | 0.202 | - | - | 943 | 15 | 0.9898 |
| STS303 | 1541 | 0.0829 | 0.6146 | 341 | 9 | 1143 | 6 | 0.9999 |
| STS304 | 1568 | 0.1019 | 0.6796 | 341 | 10 | 1206 | 4 | 0.9998 |
| STS304L | 1538 | 0.0618 | 0.5354 | 358 | 6 | 1101 | -1 | 0.9998 |
| STS310S | 1226 | 0.0336 | 0.4551 | 274 | 6 | 857 | 10 | 0.9992 |
| STS316 | 1479 | 0.0634 | 0.5842 | 305 | 8 | 1080 | 2 | 0.9999 |
| STS316L | 1337 | 0.0613 | 0.526 | 316 | 4 | 953 | 0 | 0.9999 |
| STS321 | 1314 | 0.0789 | 0.5539 | 330 | 8 | 947 | 4 | 0.9998 |
| STS347 | 1356 | 0.0333 | 0.5385 | 228 | 8 | 972 | 10 | 0.9997 |
| Inconel 600 | 1655 | 0.0341 | 0.4299 | 407 | 0 | 1151 | 17 | 0.9995 |
| Inconel 825 | 1707 | 0.0457 | 0.5287 | 350 | 3 | 1219 | 24 | 0.9995 |
| Ti-5Al-2.5Sn | 1311 | 0.0263 | 0.113 | 898 | 4 | 1025 | 0 | 0.9910 |
| Ti-6Al-4V | 1362 | 0.0034 | 0.0888 | 930 | 0 | 1099 | 0 | 0.9996 |
| Ti-6Al-6V-2Sn | 1562 | 0.0391 | 0.1489 | 998 | 0 | 1177 | 0 | 0.9997 |
| Ti-7Al-4Mo | 640 | 1.262 | 1.9765 | 1031 | 0 | 1013 | -11 | 0.9997 |
| Al2024 | 999 | 0.0124 | 0.2014 | 456 | -1 | 723 | 8 | 0.9995 |
| Al6061 | 382 | 0.0058 | 0.0799 | 268 | 4 | 312 | 5 | 0.9978 |
| Al7075 | 793 | 0.0079 | 0.1026 | 524 | 0 | 628 | 0 | 0.9994 |

도면5

| Sample | Voce | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\sigma_0$ | $\sigma_0$A | β | $\sigma_Y$ (MPa) | Error (%) | $\sigma_u$ (MPa) | Error (%) | R |
| SKH51 | 768 | 520 | 41.93 | 318 | 14 | 750 | -4 | 0.9934 |
| SK4 | 765 | 362 | 16.57 | 427 | 4 | 722 | -4 | 0.9975 |
| SCM21 | 647 | 365 | 25.49 | 315 | 15 | 623 | -4 | 0.9930 |
| SCM4 | 1008 | 355 | 45.8 | 740 | 3 | 986 | -1 | 0.9973 |
| API X100 | 919 | 355 | 39.02 | 628 | 6 | 896 | -2 | 0.9940 |
| API X120 | 1020 | 390 | 77.26 | 771 | 3 | 1007 | -2 | 0.9937 |
| STS403 | 643 | 361 | 26.86 | 314 | -5 | 620 | -8 | 0.9995 |
| STS410 | 693 | 330 | 16.13 | 383 | 7 | 653 | -3 | 0.9987 |
| STS420J2 | 806 | 426 | 25.95 | 423 | 8 | 776 | -4 | 0.9985 |
| STS440 | 805 | 520 | 37.85 | 350 | 8 | 784 | -4 | 0.9955 |
| STS303 | 1851 | 1507 | 1.4 | 354 | 13 | 1080 | 0 | 0.9998 |
| STS304 | 2499 | 2161 | 0.89 | 345 | 11 | 1174 | 1 | 0.9994 |
| STS304L | 1646 | 1280 | 1.78 | 374 | 11 | 1054 | -5 | 0.9991 |
| STS310S | 993 | 716 | 3.49 | 286 | 11 | 772 | -1 | 0.9997 |
| STS316 | 1686 | 1375 | 1.55 | 320 | 13 | 1024 | -3 | 0.9995 |
| STS316L | 1389 | 1065 | 1.9 | 331 | 9 | 910 | -4 | 0.9994 |
| STS321 | 1397 | 1065 | 1.81 | 340 | 11 | 899 | -1 | 0.9997 |
| STS347 | 1238 | 1001 | 2.43 | 244 | 16 | 877 | -1 | 0.9997 |
| Inconel 600 | 1257 | 853 | 4.2 | 420 | 4 | 1016 | 3 | 0.9998 |
| Inconel 825 | 1441 | 1094 | 2.8 | 359 | 5 | 1062 | 8 | 0.9998 |
| Ti-5Al-2.5Sn | 1114 | 237 | 11.85 | 898 | 4 | 1028 | 0 | 0.9847 |
| Ti-6Al-4V | 1134 | 247 | 21.95 | 930 | 0 | 1085 | -1 | 0.9988 |
| Ti-6Al-6V-2Sn | 1311 | 336 | 8.53 | 998 | 0 | 1174 | 0 | 0.9996 |
| Ti-7Al-4Mo | 129 | -882 | -2.24 | 1031 | 0 | 1011 | -11 | 0.9999 |
| Al2024 | 726 | 293 | 12.68 | 464 | 1 | 673 | 1 | 0.9999 |
| Al6061 | 314 | 56 | 35.07 | 369 | 4 | 306 | 3 | 0.9947 |
| Al7075 | 649 | 148 | 19.29 | 524 | 0 | 617 | -1 | 0.9985 |