

# 0.5Tm 이하에서의 AZ31 마그네슘 합금 크리이프 특성에 관한 연구

안정오<sup>†</sup> · 강대민

부경대학교 기계공학부 대학원 · 부경대학교 기계공학부 교수  
(2008. 8. 12. 접수 / 2008. 11. 21. 채택)

## A study on the creep characteristic of AZ31 Mg alloy at below 0.5Tm

Jung-Oh An<sup>†</sup> · Dae-Min Kang

Department of Mechanical Engineering Pukyong National University  
(Received August 12, 2008 / Accepted November 21, 2008)

**Abstract :** Magnesium alloys have given high attention to the industry of light-weight as automobile and electronics with aluminium, titanium and composite alloys due to their high strength, low specific density and good damping characteristics. But the magnesium contained structures under high temperature have the problems related to creep deformation and rupture life, which is a reason of developing the new material against creep deformation to use them safely. The purpose of this study is to predict the creep deformation mechanism and rupture time of AZ31 magnesium alloy. For this, creep tests of AZ31 magnesium alloy were done under constant creep load and temperature with the equipment including automatic temperature controller with acquisition computer. The apparent activation energy  $Q_c$ , the applied stress exponent  $n$  and rupture life have been determined over the temperature range below 0.5Tm and stress range of 109~187MPa, respectively, in order to investigate the creep behavior. AZ31 Magnesium alloy identify the activation energy for creep deformation and the stress dependence to creep rate at below 0.5Tm, and then investigate the mechanism for creep deformation and creep rupture life of AZ31 Magnesium alloy

### 1. 서 론

크리이프 거동에 대한 연구는 20세기 초 이래 크리이프 실험은 Phillip와 Andrade의 고전적 연구를 시작으로 25년 동안에 걸쳐서 크리이프 기구에 대한 상세한 연구가 이루어져 왔다. 크리이프 변형기구 중 0.8Tm 이상에서 주로 일어나는 확산 크리이프에 관한 연구로는, Nabarro와 Herring<sup>2)</sup>, Coble 등에 의하여 고온이고 낮은 응력 하에서 크리이프 변형이 용이하게 되는 것은 작동된 응력에 의하여 유도된 원자들의 확산의 결과라고 제안하고, 변형속도가 응력에 1차적으로 비례함을 보였다. 0.4~0.7Tm의 온도 범위에서 발생하는 전위 크리이프에 관한 연구로는 Lagneborg가 Mott에 의하여 제안된 회복 크리이프 이론을 전위 밀도의 온도와 응력의

의존성을 감안하여 이론식을 제시하였다. 크리이프 활성화에너지에 관한 실험적 연구에서 Sherby<sup>3)</sup>는 크리이프 실험도중 온도를 변화시킨 후 크리이프를 진행시켜서 측정된 크리이프 온도변환 전후의 크리이프 속도를 구하여 크리이프 활성화에너지를 구한 결과 0.5~1.0Tm 온도 구간에서의 활성화에너지는 자기확산의 활성화에너지와 거의 동일하여 이구간에서의 크리이프 변형기구는 전위상승에 의한다고 언급했다.

한편 마그네슘 합금은 최근 환경보호 및 에너지 절약 문제가 부각되면서 자동차, 항공기 등의 경량화를 위한 최적의 소재로 평가되고 있고 고온상태에서 활용도가 많으므로 재료개발을 위해서는 고온에서 마그네슘 합금에 대한 크리이프 특성 연구가 필요하다.

이러한 마그네슘합금의 특성에 대한 연구는, M.S.Dargusch 등은 다이캐스트 마그네슘 AZ91과

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
9842313@hanmail.net

AS21 합금의 크리이프 거동과 미세조직에 관한 연구에서 이러한 재료의 125~175°C의 온도 범위에서 일정하중 크리이프 실험을 통하여 AS21의 크리이프 속도는 AZ91보다 상당히 낮게 발견되었다. 두 재료의 이차크리이프 속도를 위한 응력지수 값은 저응력에서는 약 2정도의 값으로, 고응력에서는 약 5정도의 값으로 나타났다.

W.Blum 등은 여러 가지 마그네슘 합금의 크리이프 저항과 크리이프 기구에 대한 연구에서 새로운 크리이프 저항 합금 AJ51 재료를 크리이프 실험한 결과 다른 마그네슘합금 재료보다 크리이프 저항이 대단히 우수했다는 것을 증명했다.

본 논문에서는 AZ31 마그네슘 합금의 0.5Tm 미만에서 크리이프 시험을 통하여 부가응력지수(n) 및 활성화 에너지(Qc)에 대한 실험결과와 LMP의 결과를 토대로 AZ31 마그네슘 합금의 크리이프 변형기구 및 파단수명을 예측하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 시편 및 실험조건

실험에 사용했던 재료는 AZ31 마그네슘 합금으로 지름4mm 표점거리 16.3mm의 시편을 제작하였고, 시편의 규격은 Fig.1에 나타내었다.

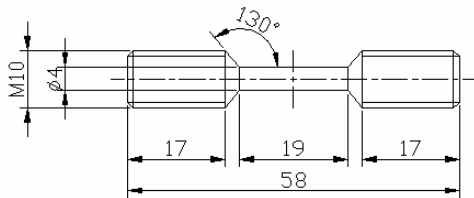


Fig.1 Creep specimen

### 2.2 실험장치

본 실험에서 사용한 크리이프 시험기는 고려진 기로에서 제작한 'KF-CT-50'으로 Fig.2와 같이 크게 운용 소프트웨어와 크리이프 시험기로 구성되어 있고 Fig.2의 크리이프 시험기는 다시 전기로, 신장계 및 부하부로 구성되며 전기로 내에서는 열전대와 전열선, 내화재로 구성 되어 있다. 노 내 온도 유지와 시편의 산화 방지를 위해 잘 밀봉되어 있고

로의 사용온도는 최고 1400°C이다. 변형량을 측정하는 신장계는 컴퓨터와 직접 연결되어 실험 시 화면상에 데이터가 바로 나타난다. 이때 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜주는 변환기에 의해 컴퓨터로 데이터가 전송된다. 그리고 하중부의 바로 밑 부분은 파단 시 충격을 흡수하고 기계의 안전을 위한 완충장치가 부착되어 있고 하중을 부가하는 부하부의 레버비는 1:10이다.

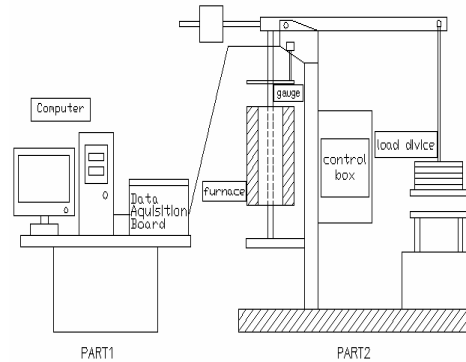


Fig.2 Equipment for creep experiment

### 2.3 실험방법

프로그램 데이터파일 중 하중, 온도, 시편의 각종 정보 등을 입력하고 각 부위의 연결 상태 점검과 센서의 연결 상태가 부드러운지 확인한 후 시편을 풀 로드(Zero Load)에 연결한다. 가장 윗부분인 레벨부분을 봉의 하단 부분의 조정나사를 이용해 수평을 맞춘 다음 컨트롤 박스에서 온도와 시간을 세팅한다. 실험온도까지 상승되면 하중을 부과하고 컴퓨터 프로그램을 작동시킨다. 작동이 되면 시간과 변위가 나타나고 그래프가 그려진다. 시험을 시작하면 설정 온도까지 올라가기 전 열팽창으로 인한 약간의 변형이 나타나므로 목표치 온도가 되었을 때 하중을 부과한 다음 실험데이터를 기록하기 시작한다. 실험이 시작되면 순간적인 탄성 변형이 나타난 후 서서히 소성 변형이 일어나기 시작한다. 변형과 함께 시편의 단면적은 줄어들며, 시편에는 일정한 하중이 작용하므로 시편이 받는 응력은 변형의 증가와 더불어 차츰 증가한다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 크리이프 곡선

정상크리이프 속도의 응력의존성과 정상크리이프 속도의 온도의존성을 구하기 위하여 온도조건 100°C~120°C 응력조건 156~187MPa, 온도조건 150°C~170°C 응력조건 109~141MPa 상태 하에서 실험하였고 대표적인 실험결과는 Fig.3~Fig.4에 나타내었다. 실험 조건 및 크리이프 곡선으로부터 구한 데이터 값은 Table2와 같다.

Table 1 Condition and result of creep experiment

Temp (°C)	Stress MPa	Creep rate (s <sup>-1</sup> )	Future time (s)
100	156	1.44X10 <sup>-7</sup>	3824680
	172	6.64X10 <sup>-7</sup>	463920
	187	2.30X10 <sup>-6</sup>	183180
110	156	4.51X10 <sup>-7</sup>	764880
	172	1.90X10 <sup>-6</sup>	138840
	187	6.50X10 <sup>-6</sup>	60780
120	156	1.05X10 <sup>-6</sup>	278280
	172	4.50X10 <sup>-6</sup>	108060
	187	1.44X10 <sup>-5</sup>	22260
150	109	3.96X10 <sup>-7</sup>	703020
	125	1.31X10 <sup>-6</sup>	180240
	141	2.40X10 <sup>-6</sup>	71040
160	109	8.96X10 <sup>-7</sup>	307680
	125	3.55X10 <sup>-6</sup>	82200
	141	7.98X10 <sup>-6</sup>	35940
170	109	1.22X10 <sup>-6</sup>	230640
	125	5.88X10 <sup>-6</sup>	46980
	141	1.52X10 <sup>-7</sup>	18840

### 3.2 응력지수의 계산

응력지수의 값을 구하기 위해서 다음과 같이 식 (1)을 이용했다.

$$n = \frac{\ln \dot{\epsilon}_2 - \ln \dot{\epsilon}_1}{\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1} \quad (1)$$

여기서 작용응력  $\sigma_1, \sigma_2$  하에서 정상 상태의 크리이프 속도는 각각  $\dot{\epsilon}_1$  및  $\dot{\epsilon}_2$ 이다. 응력지수 n값은 대수변형률과 대수 응력의 그래프에서 직선의 기울기로 표시된다. Fig.6과 Fig.7등은 100~120°C 및 150~170°C 에서 크리이프 속도와 응력과의 관계를 나타낸 것이다.

여기서 온도가 100~120°C, 응력이 156~187MPa 인 조건에서의 응력지수값은 각각 15.21, 14.65 및

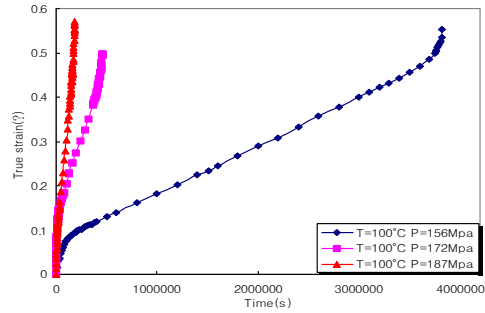


Fig.3 Family of creep curves at 50kgf

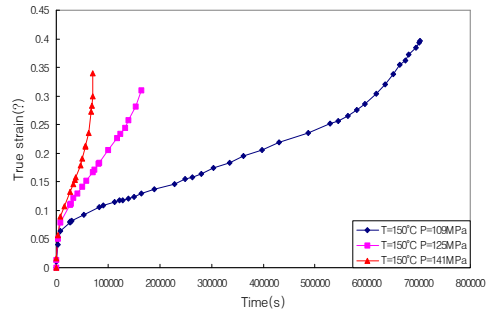


Fig.4 Family of creep curves at 50kgf

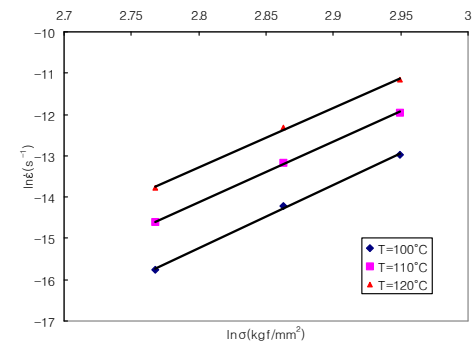


Fig.5 Stress-dependent of creep rate under 100~120°C

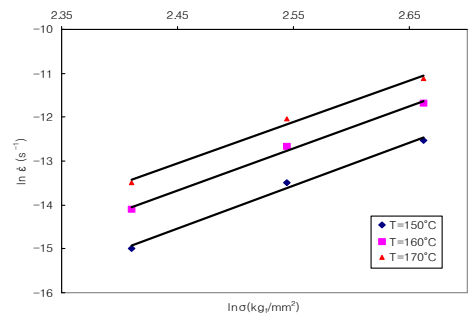


Fig.6 Stress-dependent of creep rate under 200~220°C

14.37로 약 14.72으로 나타났다. 또한 온도가 150~170°C, 응력이 109~141MPa인 조건에서의 응력 지수 값은 9.97, 9.71 및 9.55으로 약 9.74정도로 두 조건 모두 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다.

응력지수로서 예상되는 변형기구를 고찰하기 위해서 Sherby와 Burke<sup>4)</sup>의 연구를 언급하면 크리이프 속도와 부과응력의 사이에는 Fig.16 에서 보는 바와 같이 3영역이 있다. 즉 I 영역과 II영역은 변형속도가 응력의 n승에 비례하는 식으로 표시되는 크리이프 변형, 즉 “power law of creep” 이라 한다. 다시 말하면 제 I 영역에서는 0.8Tm 이상으로 확산이 주로 변형을 주도하고 응력지수 n값은 1이 된다.

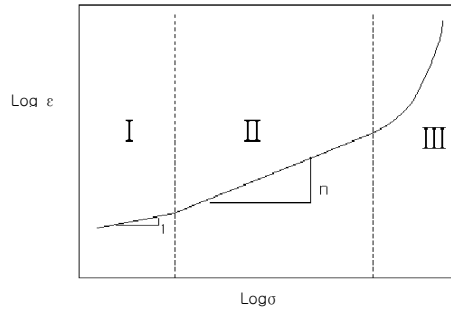
제II영역에서는 온도가 0.5Tm이상으로 전위활주와 전위상승이 변형을 지배하며 응력지수 n값은 각각 3, 5가 된다. 또한 III영역은 크리이프 변형속도가 응력의 지수함수에 비례하여 증가함을 알 수 있고 실험적으로 III영역이 발생하는 것은 낮은 온도에서 높은 응력을 작용하는 경우이다. 이러한 현상을 좀 더 자세히 설명하기 위해서 앞의 고온 크리이프 이론을 다시 살펴보면 Weertman<sup>5)</sup>, Barrett와 Nix, Lagneborg 등이 제의한 전위상승 이론에서 정상 크리이프 속도는 응력의 4~5승에 비례하고 Weertman과 Friedel의 전위 활주모델에 의하면 정상 크리이프 속도는 응력의 3승에 비례한다고 하여 결국 앞에서 언급한 여러 전위상승 및 활주이론은 전부 멱 함수식  $\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n$ 으로 된다.(Sherby와 Burke논문의 II영역)

**3.3 크리이프 활성화에너지 측정결과**

100~120°C, 150~170°C 조건 하에서 활성화 에너지를 계산하기 위해 대수 변형률과 온도사이의 관계에서 구한 기울기와 일반 기체상수(R)을 곱하여 활성화 에너지를 계산했다.

Fig.8은 압력이 109~141MPa, 온도가 150~170°C인 조건 하에서의 대수변형률과 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 압력이 109, 125 및 141MPa일 때 각각 활성화 에너지는 117.32, 113.79 및 109.67kJ/mol로 평균치는 대략 113.59kJ/mol로 나타났다.

Fig.9는 압력이 156~187MPa, 온도가 100~120°C인 조건에서의 대수 변형률과 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 압력이 156, 172 및 187MPa일 때



- I :  $T > 0.8 T_m$ : Stress directed diffusion
  - II :  $T \approx 0.5 T_m$ : Dislocation climb  
Dislocation glide
  - III :  $T = 0.4 T_m$ : Dislocation intersection:
- $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$
- $n=5, Q_c = Q_{sd}$
- $n=3, Q_c < Q_{sd}$
- $\dot{\epsilon} = A' \exp(\beta\sigma) \quad Q_c \ll Q_{sd}$

Fig.7 Influence of stress on steady state creep rate for a typical pure polycrystalline metal

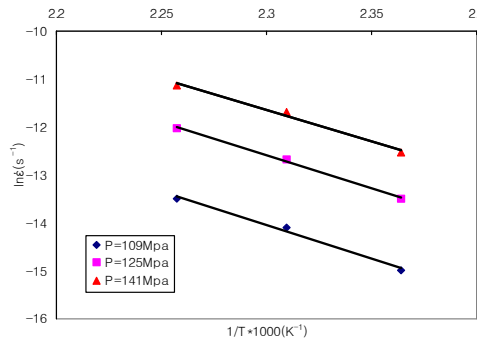


Fig.8 Stress-dependence of creep rate under 109~148MPa

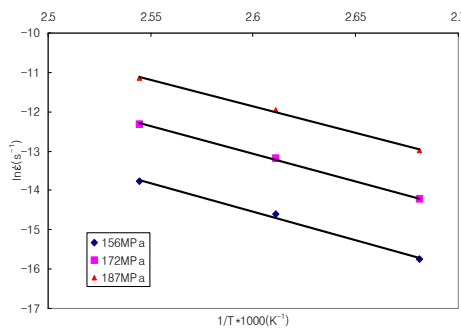


Fig.9 Stress-dependence of creep rate under 156~187MPa

각각의 활성화 에너지는 121.24, 116.72 및 111.92kJ/mole로 평균치는 116.63(kJ/mole)로 나타났다.

한편 Al원소가 Mg기저 안에서 확산할 때의 활성화 에너지 값은 143kJ/mole로 알려져 있어<sup>5)</sup> 이 내용을 참고하면 100~120°C구간, 150~170°C구간에서 모두 전위교차로 추측된다. 또한 여기서 응력이 증가할수록 활성화 에너지가 감소하는 경향이 나타나는데 이 사실은 다음과 같이 Seeger<sup>6)</sup>, Breen과 Weertman<sup>7)</sup>, Vladimira<sup>8)</sup> 및 M. Gold<sup>9)</sup> 등의 연구에서 설명된다.

Seeger의 설명에 따르면 크리이프는 열적 활성화 과정으로 외부 응력이 크리이프 변형을 저지하는 장해를 낮게 하여 활성화 에너지 Qc는 응력에 관계되어 다음 식(2)와 같이 표시하였다.

$$Q_c = Q_{sd} - V_f(\sigma) \quad (2)$$

Breen과 Weertman 등은 다결정 주석으로 실험하여 외부응력의 감소에 따라 활성화 에너지는 증가함을 보였고 Vladimira<sup>8)</sup>는 Al과 Al-Mg 합금에서의 Qc는 다음 식(3)과 같이 나타내었다.

$$Q_c = Q_{sd} - \gamma\sigma \quad (3)$$

또한 M. Gold<sup>9)</sup> 등은 저온이고 고 응력상태에서 α철의 활성화 에너지를 관찰한 결과 다음과 같이 응력이 증가함에 따라 활성화 에너지는 다음 식(4)와 같이 감소하였다.

$$Q_c = (67000 - 0.147\sigma) \text{ cal/mole} \quad (4)$$

여기서 σ의 단위는 psi이다. 결국 활성화 에너지는 외부 응력의 증가에 따라 감소하여 이것은 본 실험결과와 일치한다.

### 3.4 크리이프 파단수명

어느 온도에서 파단수명을 알고 있을 때 다른 온도범위에서의 파단수명을 예측하기 위해 식(5)와 같이 Lason-Miller 파라미터 P를 이용하였다.

$$P = (T+460)(C+\log t_f) \quad (5)$$

위 식에서 C는 Table2의 데이터를 이용하여 온도의 역수와 로그를 취한 파단시간의 좌표에서 외삽법으로 절편을 구하여 얻어질 수 있는 상수값으로 일반적으로 20~23의 값을 가진다. 여기서 구한 LM 파라미터와 응력과의 관계를 Fig.11에 나타내었다.

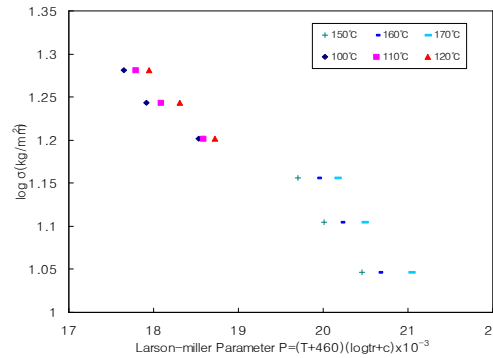


Fig.10 Relationship between Larson-Miller Parameter and stress

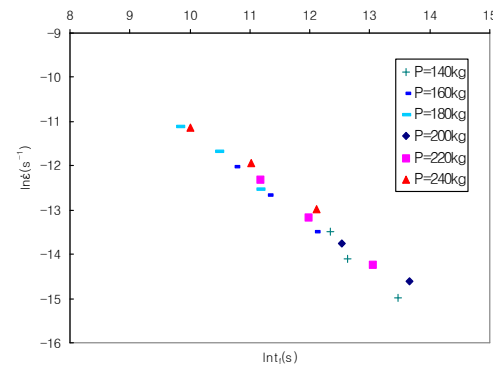


Fig.11 Relation between rupture life and temperature

Fig.11은 정상크리이프 속도와 파단시간과의 관계를 나타낸 그래프이다. 가로축을 파단시간, 세로축을 정상크리이프 속도로 두면 서로 선형적으로 반비례함을 알 수 있고 파단시간과 크리이프 속도와의 곱은 일정한 상수 값으로 나타난다.

## 4. 결론

본 연구에서 온도조건 100~120°C 응력조건 156~187MPa, 온도조건 150~170°C 응력조건 109~141MPa상태하에서 실험을 한 결과 다음과 같은 결론

을 얻었다.

- 1) 온도조건 100~120°C 응력조건이 156~187MPa인 경우의 크리이프 변형속도의 응력 의존성은 대략 14.72로 나타났고 측정된 크리이프 활성화 에너지는 대략 116.63kJ/mole로 나타났다.
- 2) 온도조건 150~170°C 응력조건이 109~141MPa인 경우의 크리이프 변형속도의 응력 의존성은 대략 9.74로 나타났고 측정된 크리이프 활성화 에너지는 대략 113.59kJ/mole로 나타났다.
- 3) 위 결과로 보아 온도조건 100~120°C, 응력조건 156~187MPa인 조건에서와 온도조건 150~170°C 응력조건 109~141MPa의 변형기구는 전위교차라 추측된다.
- 4) 온도조건 100~120°C 응력조건 156~187MPa과 온도조건 150~170°C 응력조건 109~141MPa에서 LMP를 구한결과 다음과 같다.  
 $\log \dot{\sigma} = -0.0837(T+460)(\log t + 21)10^{-3} + 2.7637$   
 $\log \dot{\sigma} = -0.0964(T+460)(\log t + 21)10^{-3} + 3.0582$   
 그리고 파단시간과 정상크리이프 속도와의 관계는 서로 선형적으로 반비례하였다.

metalloged, Vol. 28, No. 4, pp.165~169, 1969

- 9) K. Linga Murty, M. Gold, and Arthur L. Ruoff, High-Temperature Creep Mechanisms in a Iron and Other Metals, J. of App. Phy., Vol.41, pp.4917~4927, 1962

### 참고문헌

- 1) F.R.N. Nabarro, In Report of a Conference on the Strength of Soilds, The Physical Society, London, p.75, 1948
- 2) C. Heering, J. of Appl. Phys. Vol.21, p.437, 1950
- 3) O.D. Sherby, J.L. Lytton, and J.E. Dorn: Acta Met. Vol.5, pp.219~227, 1957
- 4) O.D. Sherby and P.M. Burke, Mechanical Behavior of Elevated Temperature, Progress in Materials Science, Vol. 13,pp.325~390, 1968
- 5) S. S. Valgarali and T. G. Langdon, (1982), Acta metal., Vol.30,p.1157
- 6) A. Seeger, The Temperature Dependence of the critical Shear Stress and of Work Hardening of Metal crystals, Phil. Mag., Vol.45, pp.771~773, 1954
- 7) J. Breen, and J. Weertman , Creep of polycrystalline Tin, Trans, AIME, Vol. 203, pp.1230~1234, 1955
- 8) C.V Vladimiloba, and V.A. Likhachov, Activation Energy of Creep process of Metals, Fiz metal