

رفتار سیلان آلیاژ Ti-6Al-4V تجاری با ریز ساختار لایه‌ای در
فورج همدم

حمید امیدوار^{*}، بهزادفلاح قنبری^{**} و مرتضی تمیزی^{***}
دانشکده مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱/۲۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۲/۲۷)

چکیدہ -

Ti-6Al-4V

Ti-6Al-4V : واژگان کلیدی

Flow behavior of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar structure in isotherm forging and kinetic analysis of process

H. Omidvar, B. Fallah Ghanbary and M. Tamizifar

Amirkabir University of Technology, Department of Metallurgical Engineering
Iran University of Science and Technology, Department of Materials and Metallurgical Engineering

Abstract: In this paper, plastic flow behavior and micro structural evolution of Ti-6Al-4V alloy in temperature range of 750-1050 °C and strain rate range of 0.001-0.1 (S^{-1}) in isotherm compression condition were investigated. The purpose was to estimate activation energy of globularization of lamellar structure and analyze this process kinetically. True Stress-strain curves obtained at the temperatures below 950 °C indicate a limited amount of flow softening imputed to a dynamic recrystallization occurring at about 950 °C. In contrast, at higher temperatures, the flow stress increases linearly with plastic strain until at temperatures about 1015°C where flow stress becomes nearly independent of the temperature. By analyzing flow stress data via Zener-Hol-lomon and sellars equation, Q activation energy of dynamic recrystallization was estimated and structural equation of plastic flow was obtained, whixh were comparable to results raeched by other investigators.

Keywords: Ti-6Al-4, Kinetic analysis , isothermal forging , globularization.

۱- مقدمه

آلیاژ Ti-6Al-4V (Ti-6-4) یک آلیاژ دو فازی است که چگالی کم و خواص مکانیکی عالی و مقاومت به خوردگی خوبی دارد که همین خواص این آلیاژ را یک انتخاب ایدئال برای کاربردهایی مانند صنایع هوافضا، ایمپلنتهای مورد استفاده در مهندسی پزشکی، پره‌های توربینهای گازی، بدنه‌های راکتورهای شیمیایی و... کرده است [۱و۲]

رفتار آلوتروپی تیتانیوم و به‌خصوص آلیاژهایش، اجازه اختلافات پیچیده در ریز ساختار و فرصتهای استحکام دهی متنوع‌تری را نسبت به سایر آلیاژهای فلزات غیر آهنی مانند آلومینیوم و مس فراهم می‌آورند. این تنوع ریز ساختار و خواص نه تنها با تغییر عناصر آلیاژی بلکه با عملیات حرارتی یا فرایند مکانیکی و یا تلفیقی از هر دو (عملیات ترمومکانیکی) نیز می‌تواند حاصل شود [۳]. به عنوان مثال، کار گرم یا عملیات حرارتی زیر دمای استحاله β ، باعث ایجاد یک ریز ساختار دوتایی شامل α اولیه و β استحاله یافته می‌شود، که مورفولوژی α اولیه می‌تواند از صفحات کشیده (در ماده‌ای که کمتر تحت کار گرم واقع شده) تا دانه‌های هم محور شده (در ماده‌ای که تحت کار گرم زیاد واقع شده است) تغییر کند [۴]، لذا تغییرات

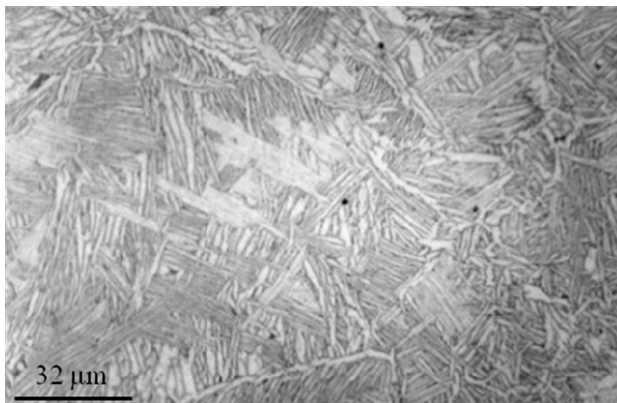
مورفولوژی از لایه‌ای به هم محور نتیجه مستقیم مقدار تغییر شکل اولیه و دمای کار گرم است. این در حین کار داغ در دماهای زیر دمای استحاله β نقش اساسی در تبدیل مورفولوژی لایه‌ای به مورفولوژی هم محور α دارد.

به دلیل اهمیت صنعتی فرایند که منجر به گلوبولی شدن ریز ساختار استحاله یافته می‌شود، بررسیهای زیادی از هر دو منظر سینتیک و مکانیزم فرایند توسط محققان صورت گرفته است [۵]. چن و کون [۶] با انجام آزمایشات فورج همدمای آلیاژ Ti-6Al-V با ریز ساختار ابتدایی بتا استحاله یافته، یک فرایند تبلور مجدد دینامیک را در محدوده دمایی $\alpha+\beta$ را گزارش کردند. سیمپاتین ات ال [۵] همچنین با انجام آزمایشات مشابه سعی در به‌دست آوردن انرژی سینتیکی این فرایند کرد. همچنین در بررسی دیگری مالکور [۷] آزمونهای فشار گرم را برای تخمین میزان کرنش محوری که گلوبولی شدن دینامیک در آن شروع و کامل می‌شود، انجام داد.

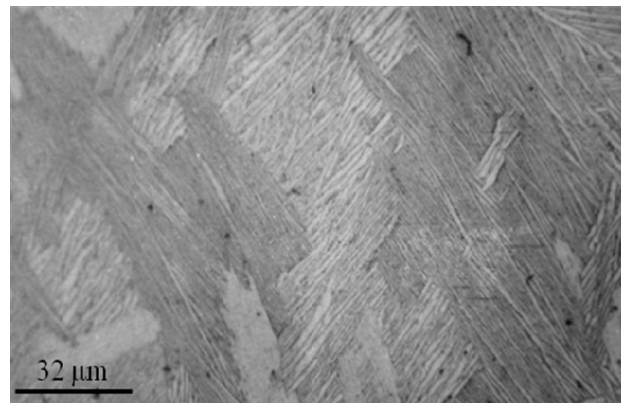
در این پژوهش رفتار سیلان این آلیاژ به منظور حصول معادله ساختاری سیلان و نیز انرژی سینتیکی فرایند در محدوده دمایی وسیعی که نواحی دو فازی و تک فازی و محدوده استحاله را در بر می‌گیرد، مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده بر حسب درصد وزنی (wt%)

Ti	Al	V	C	Fe	Pb	Cu	Sb	Bi	Ni	Mn	Zn
۸۷/۷۹۲	۶/۷	۴/۵	۰/۰۷	۰/۷۲	۰/۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳



شکل (۱-ب)- ریز ساختار میله خام دریافتی نزدیک سطح



شکل (۱-الف)- ریز ساختار میله خام در مرکز

شد. کوره از جنس مقاومتی و سنبه‌های فشاری از جنس فولاد تندبر (۱/۳۲۴۳) انتخاب شدند و برای کنترل دما سیستم کنترلر نوع K متصل به ترموکوپل نوع K به صورت سری در مدار کوره قرار گرفت. به منظور جلوگیری از خطای ناشی از چاله‌ای شدن سنبه‌ها حین فشار دردمای بالا و کاهش اصطکاک، دو قرص سرامیکی از جنس SiC در سنبه‌های بالایی و پایینی و ورق میکا قابل تعویض در محل تماس با قطعه تعبیه گردید. جهت جلوگیری از اکسیداسیون سنبه‌ها و قطعه آزمایشی از محل تعبیه شده در سنبه بالایی گاز آرگون به درون کوره به‌طور پیوسته دمیده شد. نمونه‌هایی به قطر ۷/۵mm و ارتفاع ۱۱/۲۵mm از فاصله ۱cm نسبت به محیط خارجی میله دریافتی (برای یکنواختی ساختار همه نمونه‌ها) و در جهت طولی توسط سیم برش تهیه شدند. سطوح بالایی و پایینی تمام نمونه‌ها پس از طی سیکل I شکل (۲) (برای همگن سازی ساختار) مورد عملیات آماده سازی سطحی تا مرحله پولیش قرار گرفتند. برای کمتر شدن اصطکاک بین دو قرص سرامیکی متصل به سنبه‌ها و نمونه‌ها، قبل از قرار دادن نمونه‌ها درون کوره دستگاه فشار، در دو سطح نمونه ورق میکا با الکل به طور موقت متصل شد. آزمایشهای فشار گرم، پس از همدمای شدن نمونه‌ها، در دماهای

همچنین نتایج به‌دست آمده با نتایج سایر محققان مقایسه شده است.

۲- مواد و شرح آزمونها

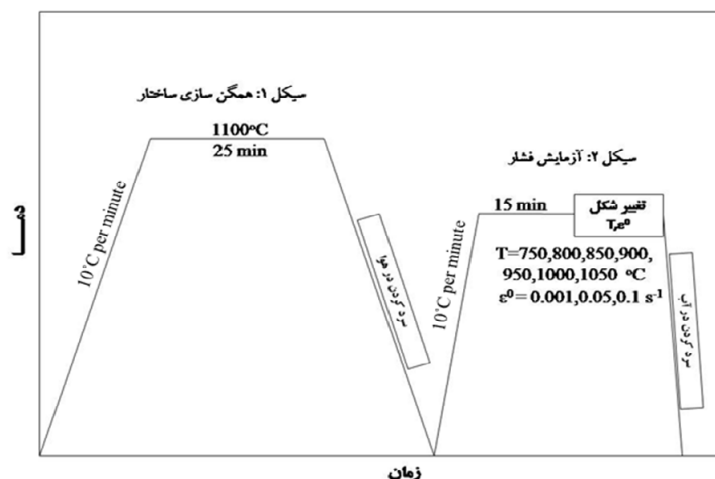
۲-۱- مواد اولیه

ماده مورد بررسی، آلیاژ Ti-6Al-4V تجاری به شکل میله‌ای به قطر ۷ میلی متر است که ترکیب شیمیایی آلیاژ بر حسب درصد وزنی از طریق روش شیمیایی تعیین و در جدول (۱) آورده شده است.

برای به‌دست آوردن ریز ساختار میله خام دریافتی دو نمونه از محیط و مرکز آن تهیه شد که در شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) ارائه شده است. در نزدیک محیط میله ریز ساختار دارای صفحات آلفای پهن تری نسبت به مرکز ملاحظه می‌شود.

۲-۲- آزمایشهای فشار گرم همدمای

این آزمایش به منظور بررسی رفتار تنش-کرنش آلیاژ مذکور انجام شد تا از منظر پدیده شناسی، سیلان در دماهای بالامطالعه شود [۷ و ۸]. لذا دستگاه آزمون کشش فشار هیدرولیک ۶۰ تن، مدل اینسترون ۸۵۰۳ به کوره مقاومتی و سنبه‌های فشاری مجهز



شکل ۲- مراحل عملیات ترمومکانیکی در آزمایش فشار گرم همدم

زیر هولومان (Z)، معادله (۳) است می توان به محاسبه انرژی اکتیواسیون پرداخت.

$$z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

$$z = A \dot{\epsilon}^m \exp\left(\frac{mQ}{RT}\right) \quad (4)$$

که در این معادله، Q انرژی اکتیواسیون و R ثابت گازها، m حساسیت به سرعت کرنش و A ثابت است.

ب) معادله اصلی سیلان پلاستیک (معادله سلارز)

توسط معادله (۶) که معروف به معادله سلارز است و منتج از معادلات (۳) و (۵) است، تنش، دما و سرعت کرنش تحت شرایط کارداخ به هم مرتبط می شوند [۹ و ۱۰] و با بهره گیری از این معادله نیز می توان به محاسبه انرژی اکتیواسیون پرداخت.

$$z = c_1 [\sinh(c_2 \sigma)]^n \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (6)$$

اگر $C_2 \sigma \ll 1$ باشد ($\sinh C_2 \sigma \approx C_2 \sigma$) معادله (۵) به صورت معادله (۷) ساده می شود که این معادله برای توصیف رفتار خزشی در تنشهای کم است و برای محاسبه ثابت n می توان از آن استفاده کرد.

$$\dot{\epsilon} = c_3 \sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (7)$$

حال اگر $1/2 < C_2 \sigma$ باشد معادله (۵) به صورت معادله (۸)

در سرعتهای کرنش $0.001, 0.005, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000, 100000$ درجه سانتیگراد و در آزمایشها اعمال نیرو تا استحصال 80% کرنش حقیقی ادامه یافت. تمام نمونه ها در جهت محور طولی از وسط بریده شده و آزمایشهای متالوگرافی بر روی آنها انجام گرفت.

۳-۲- معادلات مرتبط با سیلان پلاستیک

معادلاتی که تحلیل داده های تنش سیلان با آنها انجام گرفته است در زیر آورده شده اند. در اولین روش براساس شیوه معمول وابستگی سرعت کرنش به تنش سیلان به صورت معادله توانی بیان می شود اما روش کلی تر دیگری نیز استفاده شده است که بر اساس معادله اصلی سیلان پلاستیک است که مستلزم استفاده از تابع $\sinh \theta$ است

الف) رابطه توانی سرعت کرنش و تنش سیلان

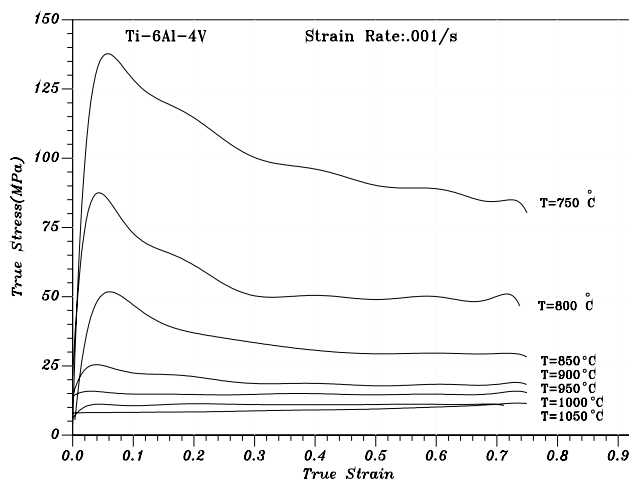
وقتی ارتباط تنش سیلان σ ، با سرعت کرنش $\dot{\epsilon}$ ، به صورت رابطه توانی (۱) بیان می شود.

$$\sigma = k \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

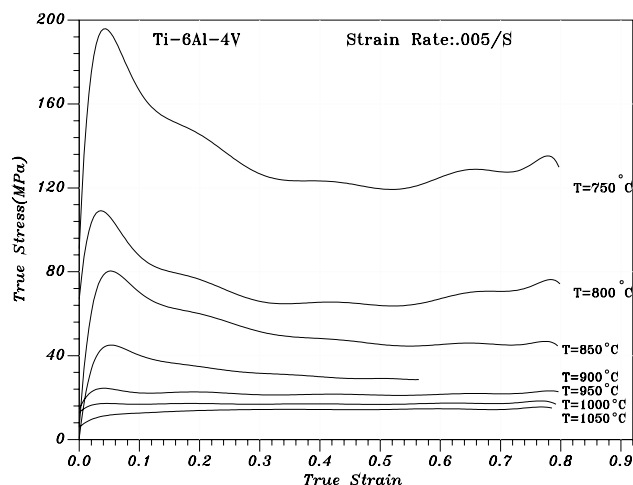
پارامتر حساسیت سرعت کرنش، m ، تابعی از دما و سرعت کرنش است [۹]، معادله (۲)

$$m = f(m, \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

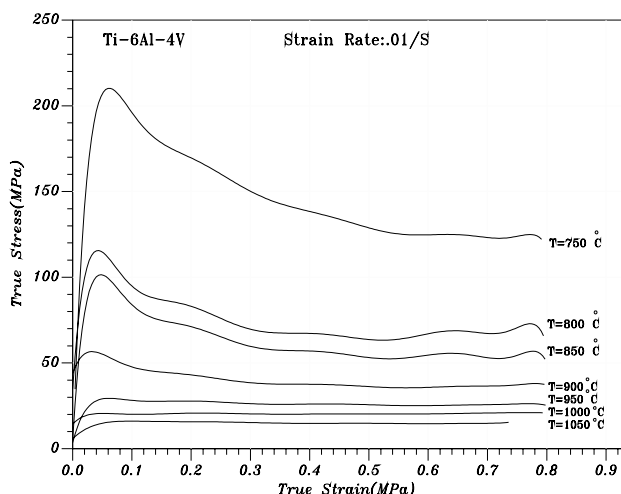
با بهره گیری از معادله (۴) که برگرفته از معادله (۱) و معادله



شکل (۳-ب) - منحنی تنش-کرنش حقیقی در سرعت کرنش 10^{-1} s^{-1}



شکل (۳-الف) - منحنی تنش-کرنش حقیقی در سرعت کرنش $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$



شکل (۳-ج) - منحنی تنش-کرنش حقیقی در سرعت کرنش 10^{-1} s^{-1}

950°C منحنیهای سیلان، نرم شدن سیلان قابل توجهی از خود نشان می‌دهند، اما این پدیده در دماهای بالاتر از 950°C دیگر مشاهده نمی‌شود و سیلان حالت پایدار مشاهده می‌شود. همچنین با مقایسه منحنیهای موجود در شکلهای مذکور و نیز عکسهای ریز ساختاری شکلهای (۴-الف) تا (۴-د) این نکته دریافت می‌شود که با کاهش دما و تا حدی افزایش سرعت کرنش میزان نرم شدن سیلان بیشتری مشاهده می‌شود [۶].

این پدیده نرم شدن سیلان را نباید به گرمایش آدیاباتیک نسبت داد چون همان‌طور که ذکر شد تمام آزمایشها در سرعتهای کرنش کم (کمتر از 1 s^{-1}) انجام شده‌اند، بلکه می‌توان فرایندهای ترمیم دینامیک را در این پدیده موثر دانست. رقابت

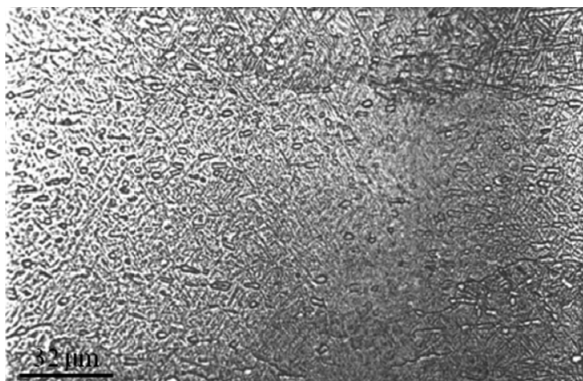
درمی‌آید که برای محاسبه ثابت α می‌توان از آن استفاده کرد:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\alpha \sigma) \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (8)$$

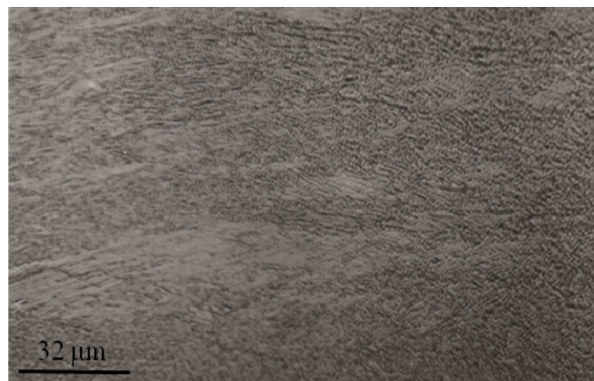
۳- نتایج و بحث

۳-۱- منحنیهای تنش کرنش حقیقی

از آنجا که تمام آزمایشها در سرعتهای کرنش کمتر از 1 s^{-1} ، صورت گرفته‌اند لذا از افزایش دمای ناشی از تغییر شکل صرف‌نظر شده است و همچنین به دلیل استفاده از روانساز، از اثر اصطکاک در محاسبات نیز صرف‌نظر شد. با بررسی نمودارهای تنش کرنش حقیقی در شکلهای (۳-الف)، (۳-ب) و (۳-ج) مشاهده می‌شود در محدوده دمایی 750°C تا



شکل (۴-ب) - ریز ساختار نهایی نمونه آزمایش شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$



شکل (۴-الف) - ریز ساختار نهایی نمونه آزمایش شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد و سرعت کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$



شکل (۴-د) - ریز ساختار نهایی نمونه آزمایش شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد و سرعت کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$



شکل (۴-ج) - ریز ساختار نهایی نمونه آزمایش شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد و سرعت کرنش $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

$\alpha + \beta$ را می‌توان به کروی شدن دینامیک فاز آلفا نسبت داد و می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده دمایی β در سرعت‌های کرنش کم پدیده سوپر پلاستیک فاز بتا اتفاق می‌افتد. سیتارامان [۴] و تانگریلا [۱۱] در تحلیل این پدیده به نتیجه مشابهی دست یافت و چن [۶] نیز در سرعت‌های کرنش کمی بیشتر از آزمایش موجود در مورد همین آلیاژ چنین روندی را مشاهده کرده است.

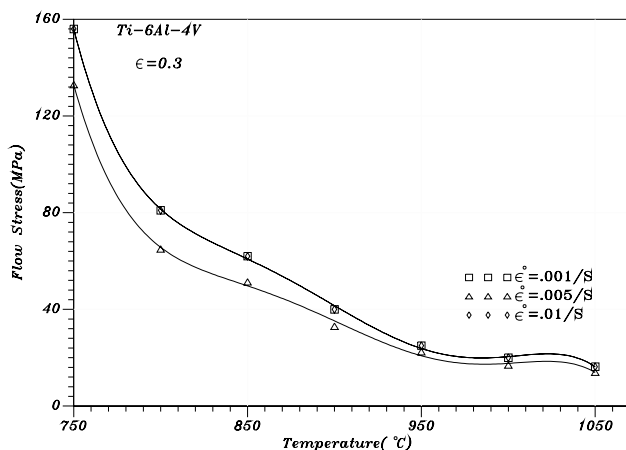
۳-۳- تحلیل داده‌های تنش سیلان

تحلیل داده‌های تنش سیلان بر مبنای دو روش ذکر شده در بالا انجام گرفته است. تمام نمودارهای این بخش در دو کرنش $1/10^3$ و $1/10^4$ ترسیم شده‌اند تا بدین ترتیب بتوان به اختلاف داده‌های محققان پی برد.

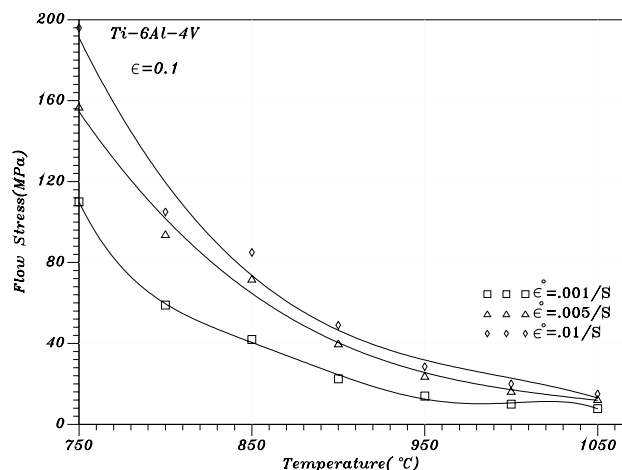
بین کارسختی و نرم شدن در دماهای کمتر از 950°C با غلبه نرم شدن سیلان ناشی از تبلور مجدد دینامیک که در اینجا به صورت کروی شدن فاز آلفا مشاهده می‌شود دلیل این پدیده است، شکل‌های (۴-الف) تا (۴-د).

۲-۳- تاثیر دما روی تنش سیلان

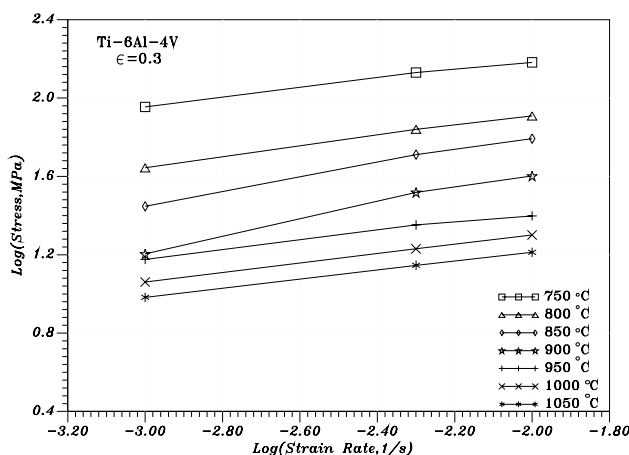
در منحنی‌های شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) با افزایش کرنش، تنش سیلان به دلیل نرم‌تر شدن آلیاژ کاهش یافته است. نکته مهم‌تر اینکه تنش سیلان در دماهای پایینتر با شدت بیشتری بادما تغییر می‌کند اما با افزایش دما میزان تغییر تنش سیلان کمتر شده تا اینکه در دماهای نزدیک دمای استحاله بتا (حدود 1015°C) تقریباً تنش سیلان مستقل از دما می‌شود. همان‌طور که ذکر شد این نرم شدن سیلان قابل ملاحظه در محدوده دمایی



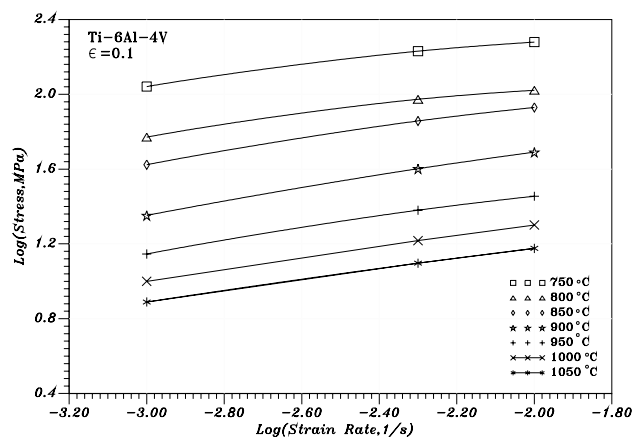
شکل (۵-ب) - تغییر تنش سیلان با دما در کرنش ۰/۳



شکل (۵-الف) - تغییر تنش سیلان با دما در کرنش ۰/۱



شکل (۶-ب) - منحنی لگاریتم تنش سیلان در برابر لگاریتم سرعت کرنش برای دماهای مختلف در کرنش ۰/۳



شکل (۶-الف) - منحنی لگاریتم تنش سیلان در برابر لگاریتم سرعت کرنش برای دماهای مختلف در کرنش ۰/۱

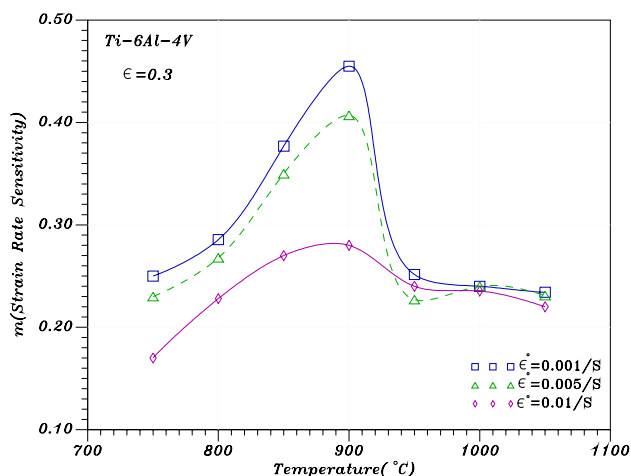
(۷-ب) مشاهده می‌شود در همه سرعت‌های کرنش با افزایش دما، افزایش حساسیت سرعت کرنش وجود دارد ولی در دماهای بالاتر از ۹۵۰ درجه سانتیگراد این پارامتر تقریباً ثابت می‌ماند. در کل مقادیر نسبتاً زیاد حساسیت سرعت کرنش مبین وقوع فرایندهای ترمیم دینامیک است زیرا به‌طوری‌که در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-د) ملاحظه می‌شود در دامنه دمایی کمتر از ۹۵۰ درجه سانتیگراد پدیده کروی شدن ساختار لایه‌ای به عنوان نوعی تبلور مجدد دینامیک (DRX) مشاهده می‌شود.

به‌منظور تعیین پارامتر حساسیت دمایی در مقیاس طبیعی، S ، منحنی‌های لگاریتم تنش سیلان در برابر عکس دما در

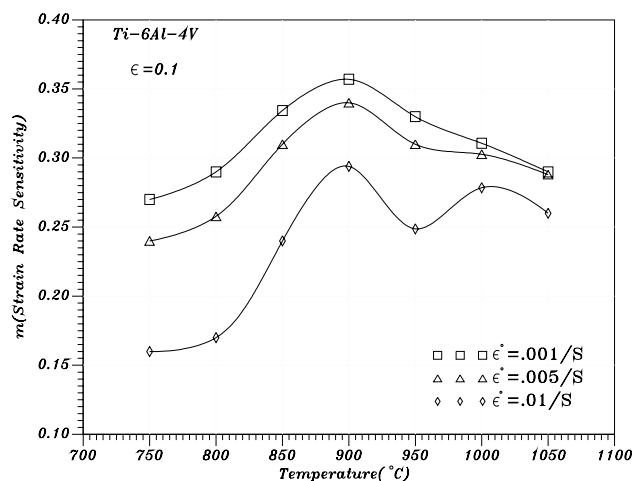
(الف) روش معمول بر اساس رابطه توانی سرعت کرنش و تنش سیلان

به منظور تعیین پارامتر حساسیت به سرعت کرنش m به عنوان تابعی از سرعت کرنش و دما، منحنی تنش سیلان با سرعت کرنش در مقیاس لگاریتمی در دماهای مختلف رسم شده‌اند، شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب). حساسیت سرعت کرنش بر مبنای معادلات (۱) و (۲) از شیب این منحنی‌ها می‌تواند تعیین شود. با میانگین گرفتن از مقادیر شیب‌ها در کرنش ۰/۱، ۰/۳ $m=$ و در کرنش ۰/۳، ۰/۳۳ $m=$ حاصل می‌شود.

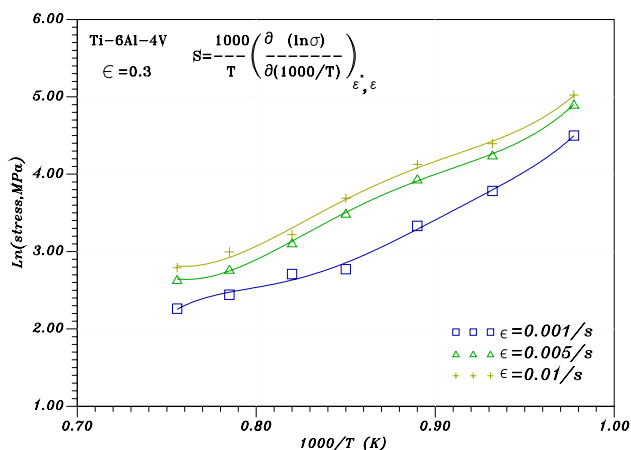
با رسم m به عنوان تابعی از دما در شکل‌های (۷-الف) و



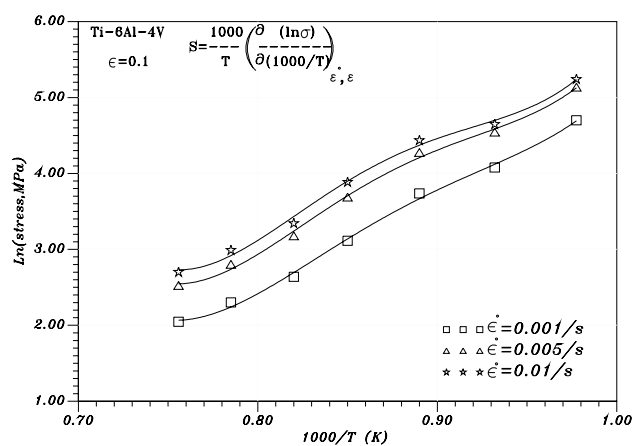
شکل (۷-ب)- تغییر حساسیت سرعت کرنش دماهای در کرنش ۰/۳



شکل (۷-الف)- تغییر حساسیت سرعت کرنش دماهای در کرنش ۰/۱



شکل (۸-ب)- لگاریتم طبیعی تنش سیلان در برابر عکس دما در سرعتهای کرنش مختلف و کرنش ثابت ۰/۳



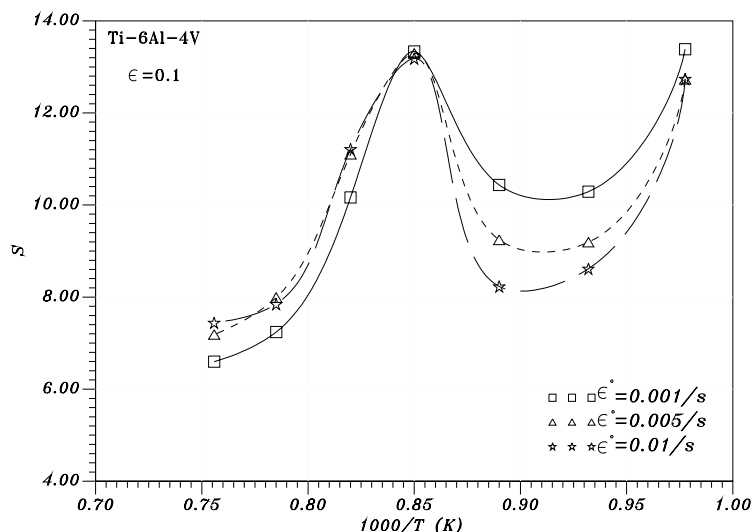
شکل (۸-الف)- لگاریتم طبیعی تنش سیلان در برابر عکس دما در سرعتهای کرنش مختلف و کرنش ثابت ۰/۱

ضعیف است، در مقابل وقتی که هم بازیابی دینامیک و هم تبلور مجدد دینامیک عمل می کنند تنش سیلان به میزان قابل ملاحظه ای با دما تغییر می کند [۱۲] لذا در شکل زیاد بودن مقدار S در دماهای کمتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد مبین تبلور مجدد دینامیک و به عبارتی کروی شدن دینامیک فازآلفاست. در خصوص بستگی پارامتر S به دما، تانگریلا [۱۱] در کرنش ۰/۳ و سیتارامان [۴] در کرنش ۰/۱ به ترتیب به دو نتیجه متفاوت کاهش مقدار S با افزایش دما و افزایش مقدار S با افزایش دما دست یافتند. اگر منحنی لگاریتم طبیعی تنش سیلان در برابر عکس دما

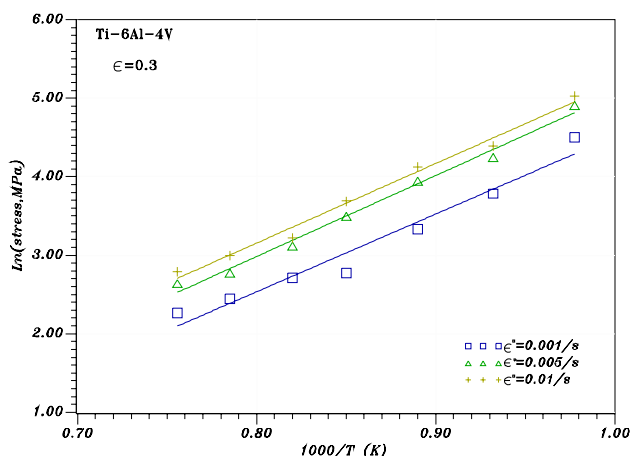
سرعتهای کرنش مختلف در شکلهای (۸-الف) و (۸-ب) رسم شده اند. S پارامتر بدون بعدی است که از شیب این منحنیها به دست می آید.

با رسم S به عنوان تابعی از عکس دما در شکل (۹) دریافت می شود میزان S با افزایش دما تا دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد کاهش یافته و پس از کمی افزایش مجدداً به روند نزولی خود ادامه می دهد (به خصوص در سرعتهای کرنش کمتر).

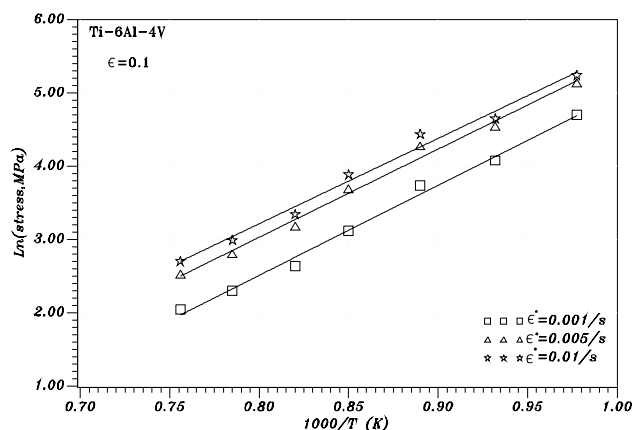
برای توجیه این روند باید به این اصل توجه داشت که بستگی دمایی تنش سیلان هنگامی که تنها فرایند بازیابی دینامیک به عنوان مکانیزم نرم شدن صورت می گیرد نسبتاً



شکل ۹- تغییر پارامتر حساسیت دمایی به عنوان تابعی از عکس دما در سرعت‌های کرنش ثابت



شکل (۱۰-ب) منحنی لگاریتم طبیعی تنش سیلان در برابر عکس دما در کرنش ۰/۳



شکل (۱۰-الف) منحنی لگاریتم طبیعی تنش سیلان در برابر عکس دما در کرنش ۰/۱

$$\sigma = 0.007\epsilon^{0.3} \exp\left(\frac{11974}{T}\right)$$

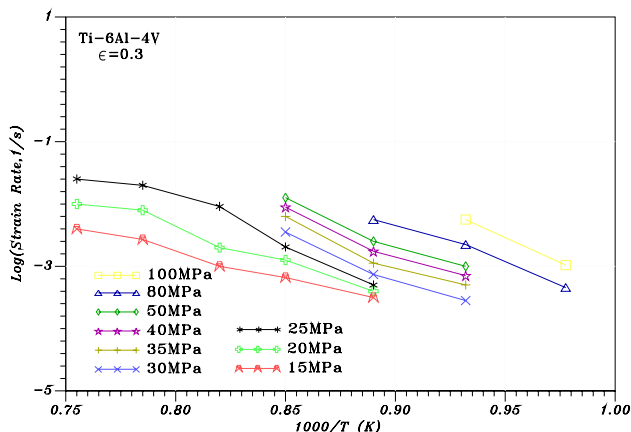
در کرنش ۰/۳، شکل (۱۰-ب) نیز به همان شیوه فوق عمل می‌شود و مقدار $Q = 253/6$ KJ/mol و $A = 0/0367$ به دست می‌آید. لذا در کرنش ۰/۳ معادله زیر را خواهیم داشت:

$$\sigma = 0.0367\epsilon^{0.33} \exp\left(\frac{10076}{T}\right)$$

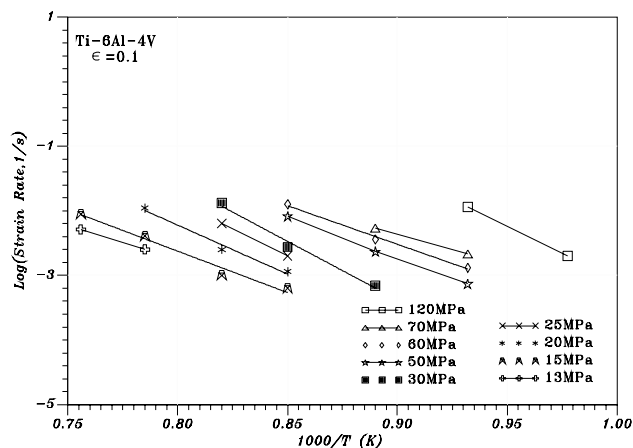
(ب) روش کلی استوار بر معادله اصلی سیلان پلاستیک (معادله سالرز)

استفاده از معادله سالرز، معادله (۶) منوط به تعیین چهار ثابت A ، α ، Q و n است. انرژی اکتیواسیون Q را می‌توان طبق

رسم شود، (شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب))، شیب خط عبوری از منحنی مساوی $\frac{mQ}{R}$ و عرض از مبدا خط معادل $\ln(A\epsilon^m)$ می‌شود. شرط چنین محاسبه‌ای ثابت فرض کردن m و Q است. در کرنش ۰/۱، شکل (۱۰-الف) میانگین شیب خطوط برابر ۱۱/۹۷ به دست می‌آید. از طرفی با مقدار متوسط $m = 0/3$ که قبلاً محاسبه شد مقدار $Q = 331/6$ KJ/mol محاسبه می‌شود. از طرفی با مساوی قرار دادن مقادیر عرض از مبدا در سرعت‌های کرنش مختلف با میانگین مقدار A برابر ۰/۰۷ به دست می‌آید، لذا در کرنش ۰/۱ معادله نهایی بدین صورت خواهد بود:



شکل (۱۱-ب)- تغییر لگاریتم سرعت کرنش در برابر عکس دما در کرنش ۰/۳



شکل (۱۱-الف)- تغییر لگاریتم سرعت کرنش در برابر عکس دما در کرنش ۰/۱

می‌توان گفت n رابطه عکس با m دارد لذا می‌توان مقدار آن را در کرنش ۰/۱ از شکل (۶-الف) و در کرنش ۰/۳ از شکل (۶-ب) به دست آورده مقدار میانگین آن معادل $n=3/33$ در کرنش ۰/۱ و $n=4/16$ در کرنش ۰/۳ به دست می‌آید.

برای محاسبه ثابت α می‌توان از دو طرف معادله (۸) لگاریتم طبیعی گرفته و طبق معادله (۱۰) آن را از شیب منحنی لگاریتم طبیعی سرعت کرنش در برابر تنش، شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب)، که در تنش‌های بالا به صورت کاملاً است، به دست آورد، یعنی:

$$\alpha = \frac{1}{n} \left(\frac{\delta \ln \varepsilon^0}{\delta \sigma} \right)_{\varepsilon, T} \quad (11)$$

در کرنش ۰/۱، شکل (۱۲-الف) خطوط با شیب میانگین برابر ۰/۰۲۶۸۲۴ داریم و با احتساب $n=3/33$ مقدار α برابر $0.008128 \text{ MPa}^{-1}$ و همچنین در کرنش ۰/۳، شکل (۱۲-ب) مقدار α معادل 0.0085 MPa^{-1} می‌شود.

برای اینکه به صحت مقایسه به دست آمده پی برده شود مقادیر را در معادله (۶) جایگزین نموده و با لگاریتم گرفتن از دو طرف معادله، شکل‌های (۱۳-الف) و (۱۳-ب) حاصل می‌شود.

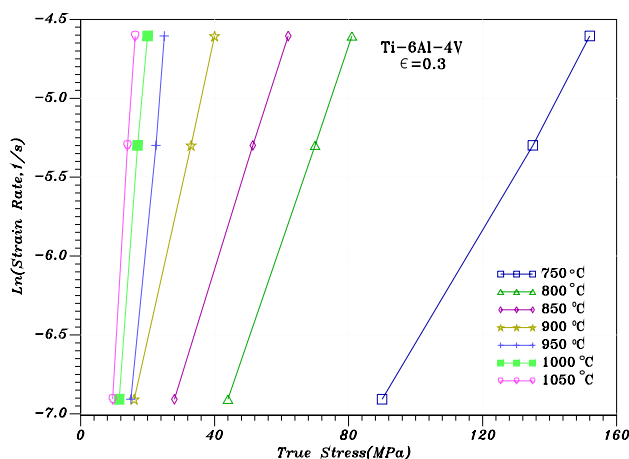
مقدار n ، A در کرنش ۰/۱ از معادله خط شکل (۱۳-الف) معادل $2/9318$ و $1/67 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ به دست می‌آید لذا معادله نهایی بدین صورت می‌شود:

معادله (۹) از شیب منحنی لگاریتم سرعت کرنش و عکس دما در سطوح کرنش ثابت، شکل‌های (۱۱-الف) و (۱۱-ب) تعیین کرد.

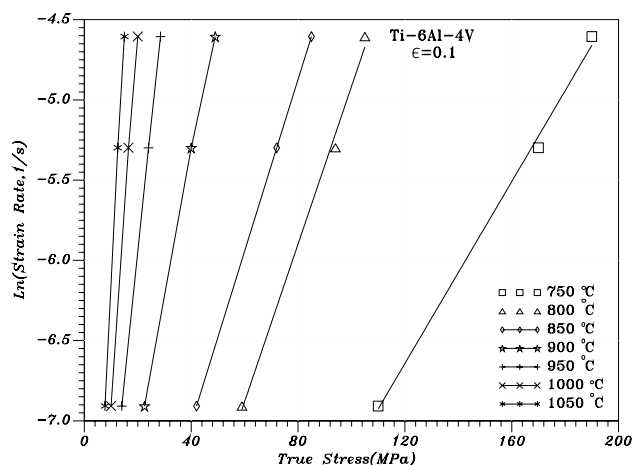
$$Q = -R \left[\frac{\partial \ln \varepsilon^0}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right] \sigma \quad (9)$$

در کرنش ۰/۱، شکل (۱۱-الف) مقدار شیب میانگین خطوط ۱۶/۵- به دست می‌آید که از آن مقدار Q معادل 316 KJ/mol حاصل می‌شود. در کرنش ۰/۳، شکل (۱۱-ب) در دماهای کمتر از 950°C درجه سانتیگراد مقدار Q $268/8 \text{ KJ/mol}$ و در دماهای بالاتر از 950°C درجه سانتیگراد $98/6 \text{ KJ/mol}$ حاصل می‌شود. این اختلاف به این دلیل است که در شکل (۱۱-ب) سه شیب که متعلق به نواحی فاز بتا، نزدیک دمای استحاله بتا و آلفا-بتا هستند وجود دارد، لذا باید سه انرژی اکتیواسیون Q_{β} ، $Q_{\text{near } \beta}$ و $Q_{\beta+\alpha}$ وجود داشته باشد. با نزدیک شدن به دمای استحاله بتا انرژی اکتیواسیون $Q_{\text{near } \beta}$ با دما تغییر کرده و این تغییرات بستگی به سرعت کرنش دارند که در میزان گلبولی شدن موثر است [۱۲]. لذا این انرژی اکتیواسیون نمی‌تواند ثابت فرض شود و مقدارش قابل محاسبه نیست. اما دو انرژی اکتیواسیون دیگر محاسبه شده‌اند و این اعداد با اعداد گزارش شده توسط تانگریلا [۱۱] تطابق خوبی دارد.

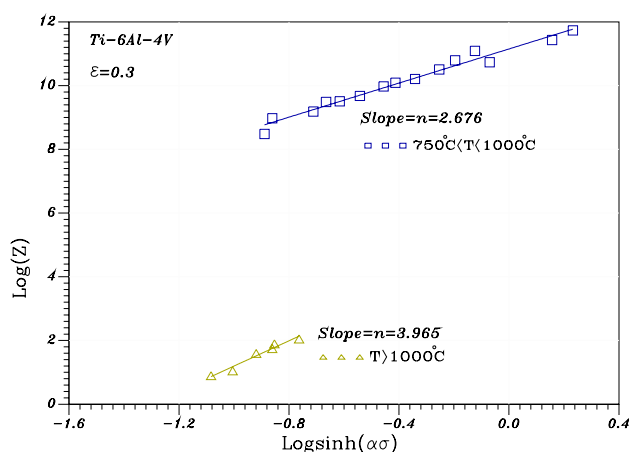
$$n = \left(\frac{\delta \ln \varepsilon^0}{\delta \ln \sigma} \right)_{\varepsilon, T} \quad (10)$$



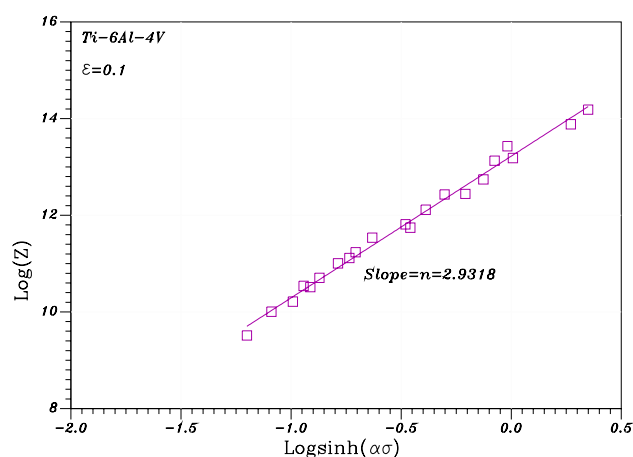
شکل (۱۲-ب)- منحنی لگاریتم طبیعی سرعت کرنش در برابر لگاریتم طبیعی تنش در کرنش ۰/۳



شکل (۱۲-الف)- منحنی لگاریتم طبیعی سرعت کرنش در برابر تنش در کرنش ۰/۱



شکل (۱۳-ب)- منحنی لگاریتم پارامتر زنر هولومان در برابر لگاریتم $\sinh(\alpha\sigma)$ برای همه مقادیر تنش در کرنش ۰/۳



شکل (۱۳-الف)- منحنی لگاریتم پارامتر زنر هولومان در برابر لگاریتم $\sinh(\alpha\sigma)$ برای همه مقادیر تنش در کرنش ۰/۱

$$\begin{aligned}
 T \geq 1000^\circ\text{C} &\longrightarrow f(\sigma) \\
 &= \varepsilon^\circ \exp\left(\frac{11865}{T}\right) \\
 &= 1.4 \times 10^5 [\sinh(0.0085\sigma)]^{3.96} \\
 &= Z
 \end{aligned}$$

به طوری که در جدول (۲) ملاحظه می شود مقدار انرژی اکتیواسیون در ناحیه دو فازی خصوصا در کرنش ۰/۳ تطابق خوبی با مقادیر گزارش شده توسط شیک-آگاروال [۱۵] و تانگریلا [۱۱] دارد. سیتارامان [۴] مقادیر زیاد انرژی اکتیواسیون n و به دست آمده را به بالا بودن سرعت کرنش و دما مربوط دانست، که البته این با نتایج سستری [۱۳] که ۴۷۰ KJ/mol و در

$$\begin{aligned}
 f(\sigma) &= \varepsilon^\circ \exp\left(\frac{38123}{T}\right) \\
 &= 1.67 \times 10^{13} [\sinh(0.008128\sigma)]^{2.93} \\
 &= Z
 \end{aligned}$$

در شکل (۱۳-ب) دو خط با شیبهای متفاوت برای دو ناحیه آلفا-بتا و بتا وجود دارد که به طریق مشابه حالت قبل مقادیر n و A محاسبه می شوند نتایج در جدول (۲) آورده شده اند، لذا معادلات نهایی بدین صورت خواهند بود:

$$\begin{aligned}
 750^\circ\text{C} \leq T < 1000^\circ\text{C} &\longrightarrow f(\sigma) \\
 &= \varepsilon^\circ \exp\left(\frac{32346}{T}\right) \\
 &= 3.16 \times 10^{11} [\sinh(0.0085\sigma)]^{2.67} = Z
 \end{aligned}$$

جدول ۲. مقایسه پارامترهای به دست آمده بر اساس معادله سلاز با سایر محققان

پارامترها	کرنش ۰/۱	کرنش ۰/۳	تانگریلا [۱۱]	سیتارامان [۴]	شبیک/آگاروال [۱۵]
$Q_{\beta+\alpha}(\text{KJ/mol})$	۳۱۶/۸	۲۶۸/۸	۲۵۱/۶	۴۳۸/۹	۲۷۳/۸
$A_{\beta+\alpha}(1/s)$	$۱/۶۷ \times ۱۰^{۱۳}$	$۳/۱۶ \times ۱۰^{۱۱}$	$۴/۴۴۶ \times ۱۰^{۱۱}$	$۳/۱۶ \times ۱۰^{۱۹}$	$۵/۲ \times ۱۰^{۱۰}$
$n_{\beta+\alpha}$	۲/۹۳	۲/۶۷	۲/۹۹	۳/۷	۳
$\alpha(\text{MPa}^{-1})$	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۷۸۱	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۷۶
$Q_{\beta}(\text{KJ/mol})$	--	۹۸/۶	۱۱۰/۱	--	--
A_{β}	--	$۱/۴ \times ۱۰^{۵}$	$۵/۷۲۸ \times ۱۰^{۵}$	--	--
n_{β}	--	۳/۹۶	۳/۴۳	--	--

سرعت‌های کرنش بالاست مطابقت دارد.

در خصوص نتایج روش معمول توانی، این نکته حائز اهمیت است که فرض شد m و Q ثابت‌اند [۱۴] در حالی که در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) مشاهده می‌شود این پارامتر به شدت تابع سرعت کرنش و تا حدودی نیز تابع دماست، لذا در روش توانی، ثابت فرض کردن m خطا ایجاد می‌کند. در خصوص نتایج به دست آمده از روش کلی مبتنی بر معادله سلاز در خصوص مقادیر Q توافق خوبی بین مقادیر به دست آمده در کرنش ۰/۳ و انرژی اکتیواسیون نفوذ شبکه برای تیتانیم بتا (۱۵۲KJ/mol) و تیتانیم آلفا (۲۴۲KJ/mol) وجود دارد [۱۱].

۴- نتیجه گیری

آلیاژ Ti-6Al-4V تحت کار داغ زیر دمای استحاله بتا یک پدیده نرم شدن سیلان از خود بروز می‌دهد که این پدیده به فرایند

ترمیم دینامیک ساختار بتا استحاله یافته از لایه‌ای به هم محور نسبت داده شده است. با تحلیل داده‌های تنش سیلان حاصل از آزمایش‌های فشار گرم ملاحظه شد پارامتر حساسیت سرعت کرنش (m) به سرعت با افزایش سرعت کرنش در ناحیه دو فازی $\alpha+\beta$ کاهش می‌یابد، اما با نزدیک شدن به دمای استحاله بتا و ورود به منطقه تک فاز بتا این پارامتر مستقل از سرعت کرنش می‌شود. پارامتر حساسیت دمایی S با افزایش دما تا دمای استحاله بتا، کاهش می‌یابد بدین ترتیب مکانیزم ترمیم از تبلور مجدد دینامیک به سمت بازایی دینامیک را باید انتظار داشت. تحلیل داده‌ها براساس رابطه توانی و نیز بر پایه معادله ساختاری سیلان پلاستیک صورت گرفت. اختلاف مقدار انرژی اکتیواسیون محاسبه شده توسط دو روش ناشی از ثابت فرض کردن m از سرعت کرنش و دما در روش معمول توانی است.

مراجع

- Donachie M. J., *Titanium: A Technical Guide*, 2nd ed., ASM International, pp. 39-41, 1999.
- Joshi, V. A., *Titanium alloys an atlas of structures and fracture features*, p. 154, Taylor & Francis, London, 2006.
- Totten, G. E., and MacKenzie D. S., *Metals handbook: Nonferrous Alloys and special-purpose Material*, 10th ed., Vol. 2, p. 586-632, ASM. International, 1999.
- Seetharaman, V., Booth, L., and Lombard, C. M., "Compressive Deformation Behavior of a Ti-6Al-4V Alloy at High Temperatures and Strain Rates," *The minerals and metals & materials society*, Vol. 419, pp. 232-241, 1991.
- Semiatin, S. L., Seetharaman V., and Weiss I., "Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti-6Al-4V with a colony alpha microstructure," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 263, pp. 257-271. 1999.
- Chen, C. C., Coyne J. E., "Deformation characteristics of Ti-6Al-4V Alloy under Isothermal Forging Condition," *Metallurgical Transactions A*,

- Vol. 7A, PP. 1931-1941, 1976.
7. Semiatin, S. L. and lahoti, G. D., "Deformation and Unstable Flow in Hot Forging of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 12A, Issue 10, pp.1705-1717. 2004.
 8. Fitzsimons, G. Kuhn, H. A. and Venkateshwar, R., "deformation and fracture testing for hot working processes," *Journal of Metals*, Vol. May, pp. 11-81, 1981.
 9. Krauss, G., Deformation, *Processing & Structure*, ASM. International, PP. 110-181&302-354, 1984.
 10. Humphreys, F. J. and Hatherly, M., *Recrystallization and Related annealing phenomena*, Pergamon, London, PP. 178-210&363-392, 1996.
 11. Tangrila, S., Chaudhury, P.K., Zhao, D. and Valencia J.J., "Hot deformation behavior of Ti-6Al-4V (ELI) alloy," *Advances in hot Deformation Textures and microstructures*, TMS, PP. 397-410, 1994.
 12. Malas, J.C. and Seetharaman, V., *Using Material Behavior Models to Develop Process Control Strategies*, JOM, Vol. 44, PP. 8-13, 1992.
 13. Sastry, S. M. L., Pao, P. S. and Sakaran, K. K., "High Temperature Deformation Behavior of a Ti-6Al-4V," *Titanium 80 4th international conference on Titanium, Kyoto*, pp. 873-866, 1980.
 14. Hosford, W.F., Caddell R. M., *Metal Forming (mechanics and metallurgy)*, Prentice Hall, New jersey, PP.80-120, 1993.
 15. Kuhlman, G. W., "Titanium precision forgings: Current Status and fracture Developments Including Role of Direct Aged Ti-10V-2Fe-3Al," *Sixth World Conference On Titanium*, Part III, pp. 1341-1353, Paris, 1989.