

15: MEKANISME PENGUATAN

Deformasi plastik kristal tunggal dalam hubungannya dengan gerakan dislokasi dan dengan mekanisme deformasi dasar untuk luncur dan untuk bentuk kembar kristal tunggal menggambarkan kondisi paling ideal untuk kuliah lebih mendalam. Penyederhanaan yang diakibatkan oleh kondisi kristal tunggal dari segi bahan membantu dalam melukiskan perilaku deformasi dalam kaitannya dengan kristalografi dan dengan struktur cacat. Terkecuali untuk alat elektronik zat padat (solid-state electronic devices), kristal tunggal jarang dipakai untuk penerapan rekayasa disebabkan oleh pembatasan yang melibatkan kekuatan, ukuran dan pembuatannya. Produk logam komersial tanpa terkecuali tersusun dari kristal individual atau dari butir individual dalam jumlah sangat banyak. Butir individual agregat polikristalin tidak mengalami perubahan bentuk sesuai hukum yang relatif sederhana, yang melukiskan deformasi plastik dalam kristal disebabkan oleh dampak penahanan butir yang mengelilinginya.

Membahas hubungan dasar perilaku dislokasi. Dari sini jelas, bahwa kekuatan berbanding terbalik dengan mobilitas dislokasi dan bahwa dalam kristal tunggal dengan kemurniaan tinggi terdapat sejumlah faktor yang mungkin, dapat mempengaruhi kekuatan perilaku mekanis. Jadi, struktur kristal menentukan jumlah dan jenis sistem luncur, menetapkan vektor Burgers dan menentukan tegangan gesekan kisi (tegangan Peierls) yang mengatur tingkat kekuatan dasar dan ketergantungan kekuatan dari temperatur. Dalam struktur padat, energi salah-susun menentukan luasnya disosiasi dislokasi, yang mempengaruhi mudahnya luncur-silang dan besarnya laju penguatan-regang selanjutnya. Kemurnian dan metode persiapan menentukan kerapatan dan: dislokasi awal dan substruktur. Variabel yang terbatas ini meneguhkan kepelikan bahwa perilaku mekanis pada umumnya tidak dapat dikaitkan sebagai fungsi regangan, laju regangan, temperatur, dan laju tegangan dengan presisi tinggi.

Tetapi, diperlukan kepelikan yang semakin besar untuk menghasilkan bahan dengan kekuatan serta kegunaan tertinggi. Jadi butir halus sering dikehendaki untuk kekuatan tinggi, penambahan atom-larut dalam jumlah besar untuk meningkatkan kekuatan dan transformasi fase dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kekuatan.

15.1. BATAS BUTIR DAN DISLOKASI

Batas antara butir-butir dalam agregat polikristalin merupakan daerah kisi yang terganggu dengan lebar hanya beberapa garis tengah atom. Dalam hal umum, orientasi kristalografi berubah dengan tiba-tiba melintasi perbatasan butir dari satu butir ke butir berikutnya. Batas butir sudut besar biasa menggambarkan daerah salah-suai rambang (random misfit) antara kisi kristal di sekitarnya. Selama perbedaan dalam orientasi antara butir di kiri kanan perbatasan berkurang, keadaan tertib di perbatasan meningkat. Untuk hal batas butir sudut rendah, di mana perbedaan orientasi sepanjang perbatasan mungkin kurang dari 1° , perbatasan terdiri dari susunan dislokasi yang teratur.

Batas butir sudut besar merupakan perbatasan dengan energi permukaan yang agak tinggi. Umpamanya, perbatasan butir dalam tembaga mempunyai energi permukaan antar bidang kira-kira sebesar 600 erg/cm^2 , sedang energi batas bentuk kembaran hanya kira-kira 25 erg/cm^2 . Disebabkan oleh energinya yang tinggi, batas butir merupakan tempat potensial untuk reaksi bahan padat (solid state reactions) seperti difusi, transformasi fase, dan reaksi pengendapan. Energi tinggi dari batas butir biasanya mengakibatkan konsentrasi atom yang larut lebih tinggi di perbatasan daripada di dalam butir. Ini menyulitkan pemisahan dampak mekanis murni batas butir terhadap sifat, dari dampak yang diakibatkan oleh segregasi ketidakmurnian.

Bilamana kristal tunggal mengalami deformasi tarik kristal tersebut biasanya bebas untuk berubah bentuk pada sistem luncur tunggal untuk bagian besar deformasi dan kristal dapat merubah orientasinya lewat rotasi kisi ketika

terjadi perpanjangan. Tetapi, butir individual dalam benda-uji polikristalin tidak harus mengalami sistem tegangan uniaksial tunggal, bilamana benda-uji mengalami deformasi tarik. Dalam polikristal, kontinuitas harus dipertahankan, sehingga batas antara kristal yang mengalami deformasi tetap tak berubah. Sekalipun tiap butir mencoba untuk berubah bentuk dengan homogen sesuaidengan deformasi benda-uji secara keseluruhan, keterbatasan yang dipaksakan oleh kontinuitas menyebabkan perbedaan yang menyolok dalam deformasi antara butir-butir berikutnyang berdekatan dan di dalam tiap butir. Kuliah tentang dformasi dalam aluminium berbutir kasar memperlihatkan bahwa regangan di sekitar batas butir biasanya berbeda antara butir dengan menyolok dari regangan di tengah-tengah butir. Sekalipun regangan bersifat kontinu sepanjang perbatasan, mungkin terdapat gradien regangan yang tajam di daerah ini.

Jika besar butir berkurang dan regangan meningkat, deformasi menjadi lebih homogen. Disebabkan oleh keterbatasan yang dipaksakan oleh batas butir, slip terjadi pada beberapa sistem, kendati regangan rendah. Hal ini menjadi penyebab terjadinya slip di bidang tak padat dalam daerah dekat batas butir. Bila garis tengah butir berkurang, lebih banyak dampak batas butir dirasakan di tengah butir. Jadi, pengerasan regangan logam berbutir halus akan besar daripada dalam. agregat polikristalin berbutir kasar.

Pada temperatur di atas setengah titik lumer, deformasi dapat terjadi karena menggelincir sepanjang batas butir. Penggelinciran *batas butir* menjadi lebil menonjol kalau temperatur naik dan laju regangan berkurang, seperti dalam creep. Pemusatan deformasi pada daerah batas-butir merupakan salah satu sumber penting bagi patah-temperatur tinggi. Oleh karena kotoran cenderung memisah ke batas butir, patah antar-butir (intergranular fracture) sangat dipengaruhi oleh komposisi. Cara kasar untuk membedakan bila penggelinciran batas-butir memegang peran ialah dengan *temperatur sanw-lekat* (equicohesive temperature). Di atas temperatur ini daerah batas

butir lebih lemah daripada bagian dalam butir dan kekuatannya meningkat dengan bertambah besarnya butir. Di bawah temperatur sama-lekat, daerah batas butir lebih kuat dari bagian dalam butir dan kekuatan bertambah besar dengan berkurangnya ukuran butir (meningkatnya daerah perbatasan butir)..

Mekanisme penguatan yang dibahas dalam bab ini termasuk kelompok yang menghambat pergerakan konservatif dislokasi. Mekanisme ini berlangsung pada temperatur sekitar $0,5 T_m$, di mana T_m adalah temperatur lebur dalam derajat Kelvin.

15.2. Mekanisme Penguatan :

15.2.1. Penguatan Butir

Bukti langsung untuk penguatan mekanik batas butir diberikan oleh eksperimen pada bikristal di mana perbedaan orientasi antara batas butir membujur diubah-ubah secara sistematis. Tegangan luluh bikristal bertambah secara linear dengan meningkatnya salah orientasi sepanjang batas-butir dan ekstrapolasi hingga sudut-salah-orientasi-nol (zero misorientation angle) memberikan harga mendekati dengan harga tegangan luluh kristal tunggal. Hasil ini mengandung makna bahwa penguatan sebagai akibat batas butir merupakan hasil interferensi bersama terhadap slip di dalam butir.

Telah dilakukan beberapa usaha untuk mengkalkulasi kurva tegangan-regangan untuk polikristal berdasarkan kurva tegangan-regangan untuk kristal tunggal.

Hubungan Hall-Petch

Hall mengusulkan suatu hubungan umumn antara tegangan luluh (dan sifat mekanik lainnya) dengan besar butir. Hubungan ini kemudian dikembangkan oleh Petch.

$$\sigma_o = \sigma_i + kD^{-1/2}$$

di mana :

σ_o = tegangan luluh

σ_i = "tegangan gesekan" yang merupakan ketahanan kisi kristal terhadap pergerakan dislokasi

k = "parameter pengancing" yang menjadi ukuran kontribusi pengerasan relatif oleh batas butir

D = diameter butir

Persarnaari Hall-Petch mula-mula disusun berdasarkan pengukuran titik luluh baja karbon rendah. Dan telah terbukti dapat menggambarkan hubungan antara besar butir dan tegang alir pada berbagai harga regang plastik hingga perpatahan rapuh. Selain itu dapat pula menggambarkan varlasi tegangan perpatahan rapuh dengan besar butir dan ketergantungan kekuatan fatik pada besar butir. Persamaan Hal-Petch juga berlaku untuk jenis batas lainnya seperti batas ferit dan perlit dalam perdit, kembaran mekanik dan pelat martensit.

Pengukuran Ukuran-Butir

Ukuran-butir diukur dengan mikroskop cahaya dengan menghitung jumlah butir pada luas yang ditentukan, dengan menentukan jumlah butir (atau batas butir) yang berpotongan dengan panjang garis sembarang yang diketahui, atau dengan membandingkannya dengan kartu (chart) ukuran butir baku. Sebagian besar pengukuran ukuran-butir memerlukan pemisalan relatif terhadap bentuk dan distribusi ukuran butir dan karena

itu, harus ditafsirkan dengan hati-hati. Seperti yang ditunjukkan oleh De Hoff dan Rhines,' teknik yang paling mudah penerapannya ialah teknik yang menyediakan informasi struktur yang dapat memberikan korelasi dengan data sifat (property data) dan yang dapat dilaksanakan dengan pengukuran relatif sederhana pada permukaan yang dipoles.

Sebagian besar pengukuran ukuran-butir bertujuan untuk mencari hubungan antara batas-butir dengan sifat mekanis spesifik. Jadi, pengukuran batas butir tiap satuan volume S_v , ialah parameter yang berguna. Smith dan Guttman' memperlihatkan bahwa S_v dapat dihitung tanpa permasalahan yang berkaitan dengan bentuk butir dan distribusi ukuran dari pengukuran jumlah rata-rata intersep garis uji rambang dengan batas butir tiap panjang satuan garis uji NL .

$$S_v = 2NL$$

Kalau dari S_v diperlukan garis tengah butir rata-rata D , garis tengah ini dapat diperoleh dengan memisalkan bahwa butir berbentuk bulat dan berukuran konstan dan mencatat bahwa tiap perbatasan terbagi rata oleh dua butir yang berdekatan

Banyak kajian telah mempergunakan panjang intersep rata-rata garis uji rambang sebagai ukuran besarnya butir. Penentuan ini dibuat dengan membagi panjang total garis uji oleh jumlah butir yang dipotong-silang.

Metode yang lazim digunakan untuk mengukur ukuran-butir di Amerika Serikat ialah membandingkan butir pada perbesaran yang ditentukan dengan kartu ukuran butir American Society for Testing and Materials (ASTM). Hubungan antara bilangan ukuran butir ASTM n dan N^* , yaitu jumlah butir tiap inci kuadrat pada perbesaran 100 X dinyatakan oleh persamaan berikut: $N^* = 2^{n-1}$

15.2.2. Penguatan Regangan

Pengerasan regangan (strain hardening) adalah penguatan yang terjadi apabila logam dideformasi plastik. Apabila logam diregang sampai terjadi deformasi plastis, maka logam tersebut akan mengalami pengerasan regangan

15.2.3. Penguatan Larutan Padat

Penguatan larutan padat (solid solution streng hardening) adalah penguatan yang terjadi akibat penambahan unsur paduan, yang larut dalam bentuk larutan padat substitusi atau larutan padat intertisi.

15.2.4. Penguatan Fasa Kedua

Pengerasan fasa kedua (secong phase hardening) adalah penguatan yang terjadi melalui melarutkan dan mendistribusikan fasa kedua dalam matrik.

15.2.5. Penguatan Presipitasi

Pengerasan presipitasi (presipitation hardening) adalah penguatan yang terjadi akibat munculnya fasa baru berupa senyawa antar logam (intermetallic). Pembentukan fasa baru dipicu oleh penambahan unsur paduan pada logam yang membentuk larutan padat. Adapun jenis mekanisme penguatan lainnya termasuk Penguatan Dispersi, Penguatan Martensit, Penguatan Tekstur