



Pengaruh Faktor dan Mekanisme Pengerasan Regangan pada Baja Hadfield

Haris Wahyudi^{1,4*}, Tatacipta Dirgantara², Rochim Suratman³, dan
Aditianto Ramelan³

¹Program Doktor Ilmu dan Teknik Material

²Kelompok Keahlian Struktur Ringan

³Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40153, Indonesia

⁴Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana
Jl. Meruya Selatan 01, Jakarta, Indonesia

*E-mail: haris.wahyudi@mercubuana.ac.id

Abstrak. Baja Hadfield memiliki sifat ketangguhan, keuletan, ketahanan impak, ketahanan terhadap aus dan memiliki *work hardening* yang sangat baik. Memiliki kandungan unsur karbon 1-1,4% dan mangan 11-14% berat, rasio kurang lebih 1:10. Potensi peningkatan kekuatan terhadap pengerasan regangan, dapat dilihat dari rentang kekuatan plastis yang lebar, kekuatan luluh 379 MPa dan kekuatan tarik 965 MPa. Pengerasan regangan baja Hadfield tergantung kepada proses pembebanan melalui mekanisme *slip* dislokasi, deformasi *twinning*, serta interaksi antara *slip* dan *twinning*. Kajian tentang *high strain rate* pada baja Hadfield menjadi topik yang cukup menarik dan relevan, meskipun telah banyak publikasi yang dihasilkan. Baja Hadfield yang memiliki kekerasan relatif rendah, mampu ditingkatkan nilai kekerasannya melalui rekayasa perlakuan panas dan deformasi plastis secara cepat. Beberapa faktor yang mempengaruhi kekerasan baja Hadfield antara lain bahan paduan, perlakuan panas dan proses pengerasan regangan yang diberikan. Nitrogen sebagai penstabil austenit penting untuk pengerjaan dingin, kromium dan vanadium ditambahkan untuk meningkatkan kekerasan karena akan membentuk karbida, dan aluminium ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan aus. Deformasi kecepatan regangan tinggi pada Hadfield memberikan peningkatan kekuatan lebih baik karena mekanisme *twinning* lebih dominan. Pengerasan regangan optimum oleh mekanisme *twinning* hanya dapat dicapai pada energi impak kritikal. *Explosive hardening* menghasilkan deformasi yang relatif kecil tetapi memberikan perubahan sifat mekanik yang signifikan.

Kata Kunci: *Baja Hadfield, high work hardening, twinning, baja mangan tinggi, explosive treatment.*

1 Pendahuluan

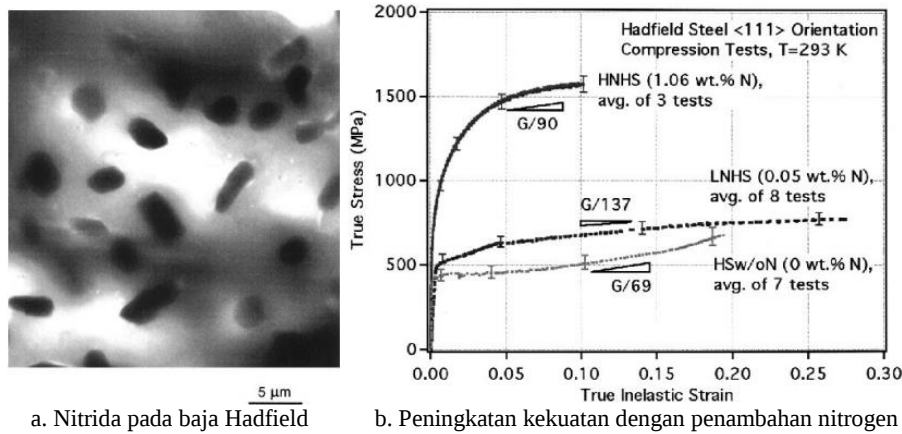
Baja Hadfield adalah baja paduan yang mengandung 11-14% mangan dan 0,9-1,3wt% karbon [1]. Pertama kali diperkenalkan oleh Robert Hadfield [2] pada tahun 1888 sebagai baja yang memiliki kemampuan pengerasan regangan baik terhadap deformasi. Baja Hadfield populer karena memiliki ketangguhan, keuletan, ketahanan impak, ketahanan terhadap aus dan memiliki *work hardening* yang sangat baik. Karena memiliki sifat pengerasan sendiri (*self-hardening*), baja mangan telah digunakan pada industri pertambangan selama beberapa tahun belakangan (*cement mixers, rock crushers, crawler treads for tractors, elevator and shovel buckets*).

Baja Hadfield memiliki struktur kristal fcc pada temperatur kamar yang diperoleh melalui proses pengecoran (*steel cast*), *solution annealing* pada temperatur 1050°C. Pemanasan sekitar satu jam dilakukan untuk melarutkan karbida dan pendinginan cepat (*quench*) ke dalam medium air dilakukan sehingga menghasilkan struktur *lattice* fcc. Kandungan karbon dan mangan tinggi pada baja Hadfield memperlambat pembentukan Perlit dan menurunkan temperatur awal pembentukan martensit (Ms) pada proses pendinginan. Baja paduan tinggi umumnya memiliki kandungan Mangan tidak lebih dari 1,5%, jika lebih dari itu Mangan memberikan sifat getas pada baja. Akan tetapi, unsur Mn mendekati 12% justru memberikan sifat baja yang ulet.

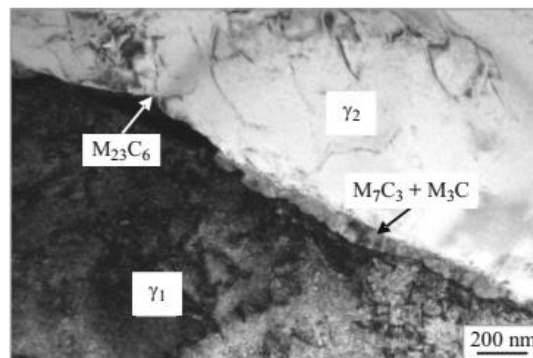
2 Pengaruh Unsur Paduan

Unsur paduan pada Hadfield berpengaruh terhadap mekanisme dislokasi dan *twinning*; *Energy Stacking Fault*; kecepatan regangan dan energi impak kritis pada saat dideformasi. Unsur Mn berperan untuk menstabilkan fasa austenit dan memperlambat transformasi isothermal fasa bainit, sehingga pada temperatur kamar fasa yang ada adalah austenit. Pengaruh unsur karbon terhadap kekuatan luluh yang optimum adalah 1-1,2 wt%, karbon di bawah 1% menurunkan kekuatan luluh baja dan di atas 1,2% tidak mempengaruhi kekuatan luluhnya. Karbon di atas 1,4 wt% tidak disarankan karena menghasilkan segregasi karbon di batas butir menghasilkan karbida.

2.1 Nitrogen



Gambar 1. Pengaruh nitrogen pada baja Hadfield: a. Nitrida pada baja Hadfield pada konsentrasi nitrogen 1,06 wt%; b. Kekuatan baja Hadfield meningkat dengan penambahan nitrogen [4]



Gambar 2. Presipitat karbida di batas butir baja Hadfield [5]

Unsur nitrogen berperan sebagai penstabil austenit dan meningkatkan ketahanan impak. Fasa austenit yang stabil diperlukan untuk proses pengerjaan dingin. Dibanding karbon, nitrogen memiliki afinitas terhadap Mn lebih baik [3]. Oleh karena itu, pembentukan nitrida dalam bentuk presipitat meningkatkan kekuatan baja Hadfield [4]. Gambar 1a menunjukkan nitrida pada baja Hadfield dalam bentuk presipitat [4]. Kandungan nitrogen tinggi 1.06 wt% meningkatkan kekuatan baja seperti ditunjukkan pada Gambar 1b. Pada Gambar 1b, HNHS maksudnya *high*

nitrogen hadfield steel 1,06 wt% N, LNHS maksudnya *low nitrogen hadfield steel* 0,05 wt% N, dan HSw/oN maksudnya baja hadfield tanpa nitrogen.

2.2 Kromium

Penambahan unsur kromium pada baja Hadfield sekitar 1,5-2,5 wt% untuk meningkatkan ketahanan aus [1]. Kromium merupakan unsur kuat pembentuk kromium karbida ($(\text{Fe, Mn, Cr})_{23}\text{C}_6$), meningkatkan kekerasan tapi di sisi lain menurunkan ketangguhan [6], [7]. Gambar 2 menunjukkan presipitat karbida pada baja Hadfield dengan penambahan paduan kromium. Pada gambar tersebut M_{23}C_6 adalah $(\text{Fe, Mn, Cr})_{23}\text{C}_6$ dan $\text{M}_7\text{C}_3 + \text{M}_3\text{C}$ adalah $(\text{Fe, Mn, Cr})_7\text{C}_3 + (\text{Fe, Mn, Cr})_3\text{C}$ [5].

2.3 Vanadium

Seperti halnya kromium, vanadium juga berperan sebagai untuk pembentuk karbida. Penambahan vanadium pada baja mangan mampu membentuk vanadium karbida (VC) dalam beberapa bentuk yaitu V_6C_5 , V_4C_3 atau V_8C_7 [8]. Vanadium 1 wt% pada baja mangan tinggi menunjukkan nilai optimum pada peningkatan sifat mekanik, ketangguhan dan ketahanan terhadap abrasi.

2.4 Alumunium

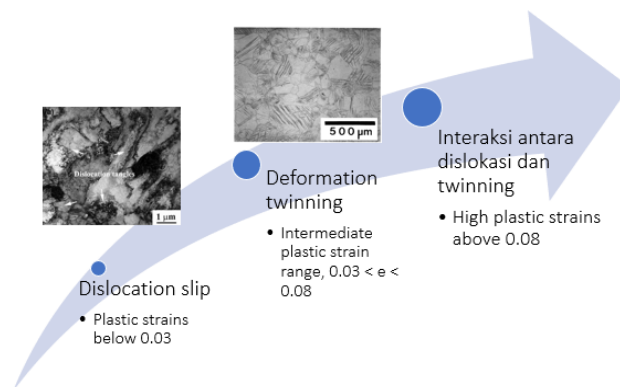
Penambahan Aluminum memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan mekanisme deformasi pada baja Hadfield [9], [10]. Peningkatan kecepatan pengerasan regangan dan ketahanan terhadap aus dilaporkan oleh [11]. Akan tetapi, unsur Al memberikan efek tidak baik terhadap *Energy Stacking Fault*. Semakin tinggi *Energy Stacking Fault*, kecenderungan terjadinya mekanisme *twinning* akan menurun.

3 Interaksi Slip Dislokasi dan Twinning

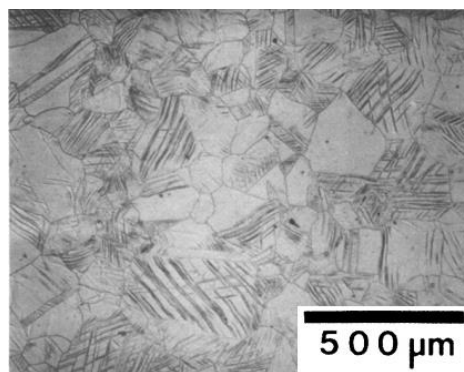
Di awal deformasi, dislokasi berperan penting kemudian berganti menjadi fenomena *twinning*. Pada regangan yang rendah, deformasi disebabkan terutama karena *slip* dan pada regangan yang banyak deformasi disebabkan karena *twin*. Deformasi *twin* merupakan faktor utama mekanisme pengerasan regangan kecepatan tinggi. Kecepatan regangan berpengaruh terhadap mekanisme deformasi pada struktur

mikro baja Hadfield. Hubungan ini bisa dilihat pada Gambar 3 di bawah. Mekanisme pengerasan regangan dibagi dalam tiga tahap [12]:

- Regangan rendah ($0,03$). Deformasi disebabkan dislokasi *slip*, dislokasi lebih dominan bergerak terjadi di dalam butir.
- Regangan medium ($0,03 < e < 0,08$). Seiring deformasi meningkat, kerapatan dislokasi juga meningkat dan deformasi dominan disebabkan oleh *twinning*.
- Regangan tinggi ($>0,08$). Ada interaksi antara interaksi antara *slip* dislokasi dan *twinning*. Deformasi *twinning* kemudian menjadi penyebab deformasi berikutnya.



Gambar 3. Tahapan pengerasan regangan



Gambar 4. Deformasi *twinning* pada baja Hadfield [13]

Pada temperatur kamar pengerasan regangan baja Hadfield terutama disebabkan oleh *twin* [13]–[17] dan interaksi antara sistem *twinning* [18]. Mekanisme *twinning* merupakan faktor utama deformasi pada bidang [111] sementara *slip* terutama terjadi pada bidang [001] [19], [20].

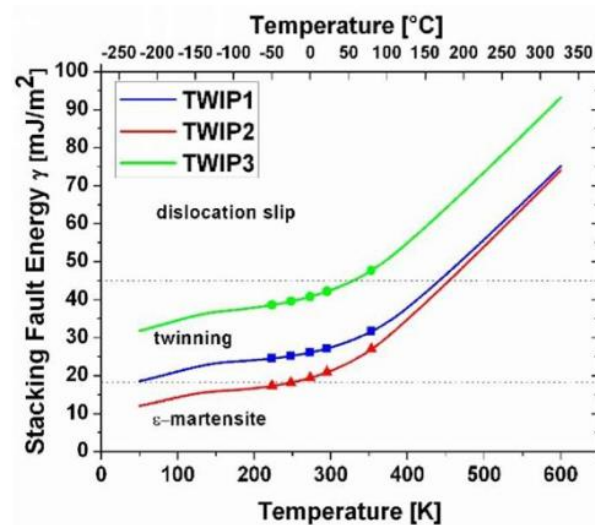
4 Energi Stacking Fault dan Temperatur

Baja Hadfield dengan kandungan atom Mn tinggi menghasilkan *Stacking Fault Energy* (SFE) rendah sehingga fenomena *twin* lebih dominan [21]. Karena SFE rendah, energi yang diperlukan untuk mekanikal *twinning* juga rendah sehingga jumlah (pembentukan) *twinning* meningkat. Pada proses *work hardening*, distribusi *twinning* yang banyak menghambat pergerakan dislokasi sehingga kekuatan meningkat. Penambahan unsur lain seperti Al dan Si pada baja Hadfield menaikkan SFE tapi fenomena *twin* berkurang sehingga deformasi plastis cenderung karena mekanisme *slip* [22]. *Stacking Fault Energy* rendah punya peran terhadap mode deformasi *twinning*, tidak ditemukan mekanisme *twinning* jika *Stacking Fault Energy* tinggi fasa austenit tinggi [23]. Kombinasi Mn-C, selama proses deformasi berdifusi di sekitar dislokasi sehingga mengunci pergerakan dislokasi, mengakibatkan kekuatan meningkat [16].

Pengerasan regangan baja Hadfield menunjukkan hubungan linear terhadap temperatur. Eksponen pengerasan regangan bervariasi antara 0,45-0,95 tergantung besarnya regangan [24]. Variasi pengerasan regangan dan temperatur menunjukkan bahwa pada 300°C terjadi penurunan efek pengerasan regangan. Hasil pengukuran kekerasan dan karakteristik struktur mikro menunjukkan hubungan yang tinggi antara deformasi *twin* dan pengerasan regangan. Gambar 5 menunjukkan kecenderungan deformasi *twinning* jika baja austenit memiliki *Energy Stacking Fault* (20 - 40 mJ/m²). Deformasi *twinning* berkurang, seiring T naik (225°C), deformasi *twin* tidak ditemukan di atas 225°C [14].

Mekanisme pengerasan regangan baja Hadfield bisa dilakukan melalui beberapa cara yaitu modifikasi unsur paduan, perlakuan panas untuk menghasilkan fasa austenit dan proses deformasi yang melibatkan kecepatan regangan tinggi. Unsur paduan normalnya ditambahkan untuk menaikkan sifat mekanik karena faktor kelarutan padat dan pembentukan karbida. Perlakuan panas (*solution annealing*) dilakukan pada temperatur 1050°C dan pendinginan cepat (*quenching*) dalam medium air. Hal ini

dilakukan untuk melarutkan karbida dan menghasilkan fasa austenit pada temperatur kamar. Metode pengerasan baja Hadfield dengan kecepatan tinggi dilakukan karena fenomena *twinning* punya kecenderungan terjadi pada *high work hardening*. Energi impak kritis menghasilkan mekanisme deformasi berbeda. Di bawah energi kritis deformasi disebabkan oleh *slip* dan dislokasi dan di atas energi kritis deformasi didominasi oleh *twinning*.



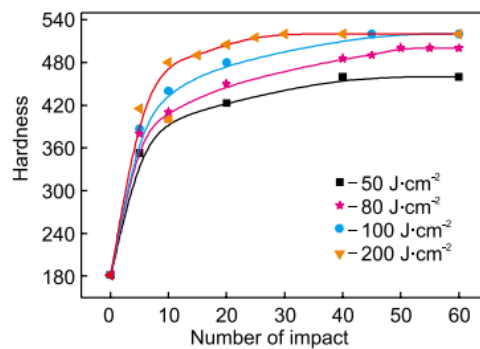
Gambar 5. Hubungan antara stacking fault energy dan mekanisme *twinning* [25]

5 Energi Deformasi dan Explosive Treatment

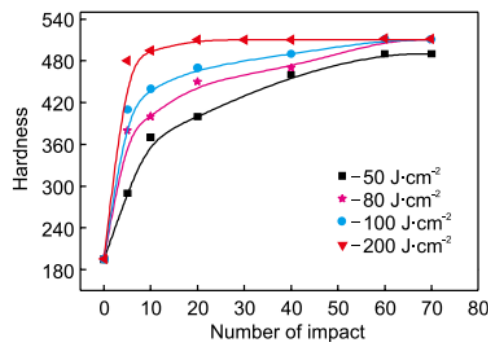
Kecepatan regangan tinggi memberikan peningkatan signifikan pada baja Hadfield. Hubungan antara pengerasan regangan dan besarnya regangan dilaporkan oleh [13]. Pada regangan rendah terjadi pengerasan regangan normal, deformasi disebabkan oleh *slip*. Akan tetapi, pada regangan tinggi terjadi ketidaknormalan pengerasan regangan yang disebabkan oleh *twinning*. Penelitian tentang laju deformasi dan metode deformasi saat ini masih memberikan fokus kepada struktur mikro dan sifat mekanik baja Hadfield. Pemberian deformasi kecepatan tinggi menyebabkan pasangan atom C-Mn berkumpul di daerah dislokasi selama proses pengerasan regangan. Ini akan mengunci pergerakan dislokasi, akibatnya kekerasan meningkat.

5.1 Energi Impak

Energi impact rendah meskipun dengan kecepatan tinggi menyebabkan daerah deformasi dangkal (hanya di bagian permukaan) tetapi kekerasan permukaan cukup tinggi [26]. Energi impact besar menghasilkan kekerasan lebih dalam tetapi nilai kekerasan yang lebih rendah. Energi impact kritis menyebabkan jenis deformasi berbeda. Di bawah energi kritis deformasi disebabkan oleh *slip* dan dislokasi dan di atas energi kritis deformasi didominasi oleh *twinning*. Energi impact kritis dilaporkan bernilai 60 J [27]; 80 J dan 100 J [28], dan 128 J [29].



(a) Spesimen baja Hadfield Mn 12,8 wt%

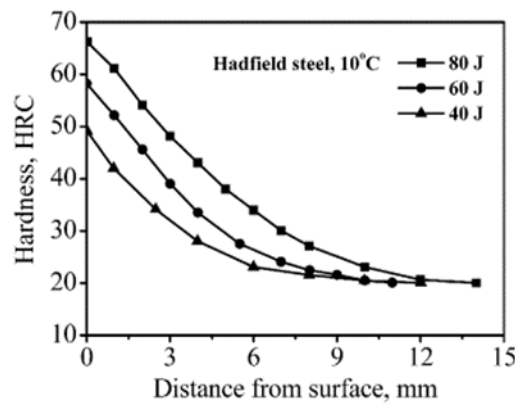


(b) Spesimen baja Hadfield Mn 14.33wt%

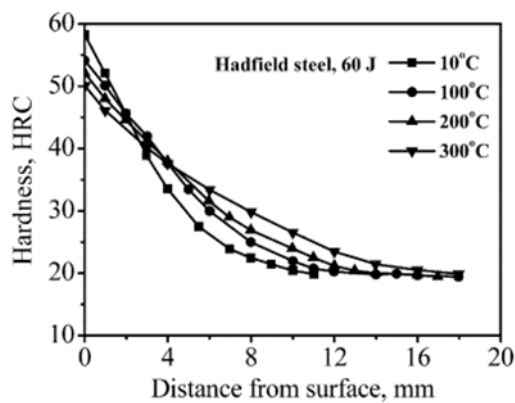
Gambar 6. Pengaruh energi impact terhadap kekerasan [28]

Pembebanan impact berulang memberi pengaruh berbeda terhadap mekanisme deformasi dan sifat mekanik baja Hadfield. Beban impact berulang mampu meningkatkan kekerasan baja Hadfield dengan

perlakuan panas sebelumnya. Proses pembebanan impak tersebut dilakukan dengan variasi jumlah pembebanan 30 kali, 60 kali, 120 kali, dan 210. Kekerasan optimum diperoleh pada sampel yang mengalami *tempering* pada temperatur 500°C dan proses tumbukan 210 kali adalah 407 HB [30].



(a) Variasi energi impak terhadap kekerasan



b) Variasi temperatur terhadap kekerasan pada energi impak 60 J

Gambar 7. Hubungan energi impak dan kekerasan [27]

Pembebanan impak dengan variasi energi menghasilkan nilai kekerasan optimum jika energinya mencapai nilai kritis tertentu. Variasi energi impak seperti ditunjukkan dalam Gambar 6 adalah 50 Jcm⁻², 80 Jcm⁻², 100 Jcm⁻² dan 200 Jcm⁻² (ukuran spesimen 1 cm²) dengan masing-masing pengulangan sebesar 10-70 kali [28]. Semakin tinggi energi

impak kerapatan *slip*, dislokasi dan *twinning* juga meningkat. Nilai kekerasan dipengaruhi oleh energi impact dan bukan jumlah impact yang diberikan. Mekanisme deformasi di bawah energi kritis adalah *slip* dan dislokasi sedangkan di atas energi kritis didominasi oleh *twinning*. Pengaruh *twinning* jauh lebih besar dalam memberikan pengaruh terhadap kekerasan baja Hadfield.

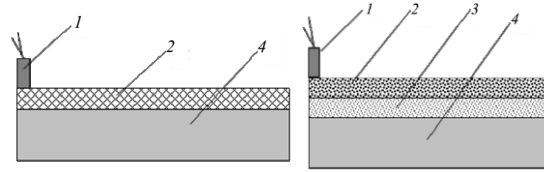
Energi impact kritis berbanding terbalik dengan kandungan Mn. Gambar 6 menunjukkan hubungan energi impact dan kekerasan untuk dua spesimen baja Hadfield berbeda (a) kandungan Mn 12,8 dan (b) 14,33 (%wt). Nilai impact kritisnya berturut-turut adalah 100 J dan 80 J.

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara kekerasan dan kedalaman spesimen pada energi impact berbeda. Energi impact kritikal sebesar 60 J menghasilkan kekerasan yang optimum 58 HRc (F. C. Zhang et al., 2011). Temperatur proses impact yaitu 300°C memberikan kombinasi plastisitas dan ketangguhan yang baik.

5.2 Explosive Treatment

Pengerasan permukaan dengan metode ledakan dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik permukaan, subsurface dan bahkan keseluruhan benda kerja (*bulk materials*) [31]–[33]. Peningkatan kekuatan dan kekerasan ini disebabkan meningkatnya kerapatan dislokasi dan *microtwins* [34]. Struktur mikro material juga dilaporkan berubah seperti peningkatan *twinning*, *point defects*, dan kerapatan dislokasi [35]. Peningkatan jumlah *twinning* akibat *explosive treatment* juga dilaporkan oleh [36] pada baja mangan dan pada baja karbon medium [37] yang mengakibatkan peningkatan kekerasan permukaannya.

Metode pengerasan *explosive* menghasilkan deformasi minimum (*low sinkage*) dan penetrasi yang cukup (15mm). Metode pengerasan regangan dengan metode ledakan memiliki potensi besar untuk meningkatkan sifat mekanik logam. Tingginya energi yang diberikan kepada logam (sepuluh atau seratus kali lebih besar dari tegangan luluh) menyebabkan perubahan struktur yang signifikan. Beberapa faktor juga berpengaruh terhadap pengerasan regangan ini antara lain *Stacking Fault Energy*, *materials' defects*, dan komposisi bahan [38].



Gambar 8. Skema pengerasan explosive

(1. Detonator, 2. Bahan explosive, 3. Lapisan porous (pasir), 4. Specimen [39])

Skema pengerasan *explosive* bisa dilihat pada Gambar 8. Metode ini diterapkan di Novosibirsk Railroad Switch Plant, Rusia. Saat ini di sana menghasilkan 10–12 ribu *railway switch frog* per tahun. Lebih dari 90% komponen R65 *frogs* (grade 1/11 dan 1/9) di-*treatment* melalui *explosive* dan menghasilkan peningkatan umur 20-30 % [39].

Pengerasan menggunakan ledakan memiliki keuntungan karena prosesnya yang relatif cepat dan menghasilkan *sinkage* yang rendah. Keuntungan proses pengerasan ledakan antara lain penambahan umur komponen [32], [39], [40] yang disebabkan peningkatan kekuatan dan kekerasan komponen *frog* sehingga ketahanan deformasi juga meningkat. Proses pengerasan ledakan menghasilkan kombinasi nilai kekerasan dan kedalaman yang sesuai sebagai syarat untuk komponen *frog* yaitu 360 HB dan 25 mm [40]; 382 HV dan 32 mm [41]; 327 - 363 HB [42]; 39 HRC dan 35 mm [43], 350HB [44]; 350–380 HB and 30-35 mm [39]. Pengerasan ledakan menghasilkan deformasi lebih kecil (4%) tetapi kenaikan kekerasan yang relatif besar, ~39 HRC [43]. Mekanisme pengerasan regangan adalah deformasi oleh dislokasi dan *twin* dalam skala nano [40].

6 Kesimpulan

Berdasarkan kajian studi literatur mekanisme pengerasan regangan baja Hadfield dapat diringkas beberapa poin penting sebagai berikut:

- Penambahan unsur paduan nitrogen, kromium, vanadium dan aluminium meningkatkan sifat mekanik baja Hadfield, ketangguhan dan ketahanan terhadap aus serta abrasi.
- Dynamic strain aging berperan penting dalam mekanisme pengerasan regangan kecepatan tinggi. Regangan plastis

dikategorikan menjadi tiga: *plastic strains* di bawah 0,03, *intermediate plastic strain* $0,03 < e < 0,08$ dan *high plastic strains* di atas 0,08.

- Pasangan atom C-Mn berkumpul di daerah dislokasi selama proses pengerasan regangan. Pengurangan komposisi karbon dari 1,2 ke 0,8 tidak berpengaruh terhadap sifat pengerasan regangan baja Hadfield.
- Twinning bukan merupakan penyebab utama parameter pengerasan regangan (laju regangan normal). *Twinning* terjadi pada bidang [111] sedangkan *slip* terjadi pada bidang [001].
- Deformasi plastis rendah pada kecepatan regangan tinggi menghasilkan nilai kekerasan yang relatif sama pada proses deformasi plastis banyak pada kecepatan regangan rendah. Pada temperatur tinggi, mekanisme deformasi terutama disebabkan oleh *slip*.
- Pengerasan regangan optimum oleh mekanisme *twinning* hanya dapat dicapai pada energi impact kritikal. Di bawah energi impact kritikal, *slip* dan dislokasi berperan dominan dan pada energi lebih tinggi dari impact energi mekanisme *twinning* lebih dominan. *Explosive hardening* menghasilkan deformasi yang relatif kecil tetapi memberikan perubahan sifat mekanik yang signifikan.

7 Referensi

- [1] A. 128M ASTM International, *Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese*, 2003.
- [2] J. D. Weeks, *Hadfield's Manganese Steel*, Science (80-.), vol. ns-12, no. 306, pp. 284 LP – 286, Dec. 1888.
- [3] V. G. Gavriluk and H. Berns, *High Nitrogen Steels: Structure, Properties, Manufacture, Applications*, 1999.
- [4] D. Canadinc, I. Karaman, H. Sehitoglu, Y. I. Chumlyakov, and H. J. Maier, *The Role of Nitrogen on The Deformation Response of Hadfield Steel Single Crystals*, Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., 2003.
- [5] Z. Ding, B. Liang, R. Zhao, and C. Chen, *Precipitation of Carbides in Early Aging Stages and Their Crystallographic Orientations in Hadfield Steel Mn13*, Met. Sci. Heat Treat., 2015.
- [6] J. O. Agunsoye, T. S. Isaac, and A. A. Abiona, *On the Comparison of*

- Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of High Chromium White Iron with the Hadfield Austenitic Manganese Steel*, J. Miner. Mater. Charact. Eng., 2013.
- [7] I. El-Mahallawi, R. Abdel-Karim, and A. Naguib, *Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel*, Mater. Sci. Technol., 2001.
- [8] M. K. Pham, D. N. Nguyen, and A. T. Hoang, *Influence of Vanadium Content on The Microstructure and Mechanical Properties of High-Manganese Steel*, Int. J. Mech. Mechatronics Eng., 2018.
- [9] D. Canadinc, H. Sehitoglu, and H. J. Maier, *The Role of Dense Dislocation Walls on the Deformation Response of Aluminum Alloyed Hadfield Steel Polycrystals*, Mater. Sci. Eng. A, 2007.
- [10] E. G. Zakharova, I. V. Kireeva, Y. I. Chumlyakov, S. P. Efimenko, H. Sehitoglu, and I. Karaman, *Deformation Mechanisms and Strain Hardening of Hadfield-Steel Single Crystals Alloyed with Aluminum*, Dokl. Phys., 2002.
- [11] B. K. Zuidema, D. K. Subramanyam, and W. C. Leslie, *Effect of Aluminum on the Work Hardening and Wear Resistance of Hadfield Manganese Steel.*, Metall. Trans. A, Phys. Metall. Mater. Sci., 1987.
- [12] S. B. Sant and R. W. Smith, *A Study in the Work-Hardening Behaviour of Austenitic Manganese Steels*, J. Mater. Sci., 1987.
- [13] P. H. Adler, G. B. Olson, and W. S. Owen, *Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel*, Metall. Mater. Trans. A, 1986.
- [14] Y. N. Dastur and W. C. Leslie, *Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel.*, Metall. Trans. A, Phys. Metall. Mater. Sci., 1981.
- [15] M. A. Shtremel and I. A. Kovalenko, *The Mechanism of Hardening of Hadfield Steel*, Fiz. Met. i Metalloved., vol. 63, no. 1, pp. 172–180, 1987.
- [16] W. S. Owen and M. Grujicic, *Strain Aging of Austenitic Hadfield Manganese Steel*, Acta Mater., 1998.
- [17] I. Karaman, H. Sehitoglu, A. J. Beaudoev, Y. I. Chumlyakov, H. J. Maier, and C. N. Tomé, *Modeling the Deformation Behavior of Hadfield Steel Single and Polycrystals Due To Twinning And Slip*, Acta Mater., 2000.
- [18] Y. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, H. Sehitoglu, E. I. Litvinova, E. G. Zaharova, and N. V. Luzginova, *High-Strength Single Crystals of Austenitic Stainless Steels with Nitrogen Content: Mechanisms of Deformation and Fracture*, Mater. Sci. Forum, 2009.
- [19] I. Karaman, H. Sehitoglu, K. Gall, and Y. I. Chumlyakov, *On The Deformation Mechanisms in Single Crystal Hadfield Manganese Steels*, Scr. Mater., 1998.
- [20] I. Karaman, H. Sehitoglu, K. Gall, Y. I. Chumlyakov, and H. J. Maier,

- Deformation of Single Crystal Hadfield Steel by Twinning and Slip*, Acta Mater., 2000.
- [21] S. Kibey, J. B. Liu, D. D. Johnson, and H. Sehitoglu, *Predicting Twinning Stress in Fcc Metals: Linking Twin-Energy Pathways to Twin Nucleation*, Acta Mater., 2007.
 - [22] A. Dumay, J. P. Chateau, S. Allain, S. Migot, and O. Bouaziz, *Influence of Addition Elements on the Stacking-Fault Energy and Mechanical Properties of an Austenitic Fe-Mn-C Steel*, Mater. Sci. Eng. A, 2008.
 - [23] K. S. RAGHAVAN, A. S. Sastri, and M. J. Marcinkowski, *Nature Of The Work-Hardening Behavior In Hadfield's Manganese Steel*, Trans. Metall. Soc. AIME, 1969.
 - [24] E. Bayraktar, C. Levallant, and S. Altintas, *Strain Rate and Temperature Effect on the Deformation Behaviour of the Original Hadfield Steel*, in Journal De Physique, 1993.
 - [25] S. Curtze and V. T. Kuokkala, *Effects of Temperature and Strain Rate on the Tensile Properties of TWIP Steels*, in 65th ABM International Congress, 18th IFHTSE Congress and 1st TMS/ABM International Materials Congress 2010, 2010.
 - [26] H. S. Avery, *Austenitic Manganese Steel*, in ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, 2005, pp. 1274–1302.
 - [27] F. C. Zhang, Z. N. Yang, L. H. Qian, F. C. Liu, B. Lv, and M. Zhang, *High Speed Pounding: A Novel Technique for the Preparation of A Thick Surface Layer with A Hardness Gradient Distribution on Hadfield Steel*,” Scr. Mater., 2011.
 - [28] L. Xiaoyun, W. Wei, Z. Fangqiu, L. Lanjun, and Z. Xianfeng, *Influence of Impact Energy on Work Hardening Ability of Austenitic Manganese Steel and Its Mechanism*, China Foundry, vol. 9, no. 3, pp. 248–251, 2012.
 - [29] H. Enginsoy, E. Bayraktar, and A. Kurşun, *A Comprehensive Study on the Deformation Behavior of Hadfield Steel Sheets Subjected to the Drop Weight Test: Experimental Study and Finite Element Modeling*, Metals (Basel), 2018.
 - [30] I. Farida, *Analisis Sifat Mekanik pada Baja Hadfield setelah Proses Solution Annealing, Solution Annealing dan Temper, Serta Repetitive Hammering*, Institut Teknologi Bandung, 2019.
 - [31] H. Wang, Z. Shi, X. Yaer, Z. Tong, and Z. Du, *High Mechanical Performance of AISI304 Stainless Steel Plate by Surface Nanocrystallization and Microstructural Evolution During the Explosive Impact Treatment*, Journal of Materials Research and Technology, 2018.
 - [32] A. A. Deribas, F. I. Matveenkov, and T. M. Sobolenko, *Explosive Hardening of High-Manganese Steel*, Combust. Explos. Shock Waves, 1969.

- [33] J. S. Rinehart, *Work-Hardening of Mild Steel by Explosive Attack* [4],” *Journal of Applied Physics*. 1951.
- [34] M. A. Krishtal, A. D. Lyuchkov, S. N. Verkhovskii, V. S. Vakhrusheva, and P. M. Yushkevich, *Hardening of Quenched Low-Carbon Steel During Explosive Forming*, *Met. Sci. Heat Treat.*, 1978.
- [35] F. E. Van Wely, *Comparison Between the Influence of Cold Pressing and Explosive Forming on Material Properties of Steel*, in 4th International Conference of the Center for High-Energy Forming, 1973, pp. 9–13.
- [36] M. Li, S. Zhao, and G. Shi, *Explosive Hardening of High Mn Steel*, *Acta Metall. Sin. Lett.*, vol. 4, no. 9, p. 164, 1991.
- [37] I. A. Bataev, I. A. Balagansky, A. Bataev, and K. Hokamoto, *Transformation of Structure in Carbon Steel Specimen under Loading by Mach Stem, Formed in Preliminary Compressed High Explosive Charge TG-40*, *Mater. Sci. Forum*, 2011.
- [38] T. L. Donukis, G. I. Savvakina, P. V. Titov, and L. G. Khandros, *Hardening of Steel During Explosive Loading*, *Sov. Mater. Sci.*, 1973.
- [39] A. A. Deribas, A. A. Shtertser, and E. E. Zubkov, *Explosive Hardening And Its Application In Production Of Railroad Switch Frogs*, in *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations*, 2018.
- [40] F. Zhang *et al.*, *Microstructure and Properties of Purity High Mn Steel Crossing Explosion Hardened*, *ISIJ Int.*, 2008.
- [41] F. C. Liu, B. Lv, F. C. Zhang, and S. Yang, *Enhanced Work Hardening in Hadfield Steel During Explosive Treatment*, *Mater. Lett.*, 2011.
- [42] H. Petr and B. Kateřina, *Experience with Explosive Hardening of Railway Frogs From Hadfield Steel*, in *Metal 2012*, 2012.
- [43] M. Zhang, B. Lv, F. Zhang, and X. Feng, *Explosion Deformation and Hardening Behaviours of Hadfield Steel Crossing*, *ISIJ Int.*, 2012.
- [44] X. Y. Hu, Z. W. Shen, Y. Bin Liu, and T. S. liu, *On Elastic-Plastic Explosives for Explosive Hardening*, *Adv. Mater. Res.*, 2013.