

Nghiên cứu luyện và xử lý nhiệt một số mác thép độ bền cao tiên tiến

Đinh Bá Trự^{1,2*}, Trần Văn Đoàn², Phan Thanh Bình², Đinh Văn Hiến³,
Trần Công Thức⁴, Lê Văn Long⁵, Nguyễn Tiến An⁶

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Công ty JSC MIREX

³Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

⁴Trường Đại học Thái Bình

⁵Viện Công nghệ, Bộ Quốc phòng

⁶Trường Sĩ quan Lục quân I

Ngày nhận bài 16/10/2018; ngày chuyển phản biện 19/10/2018; ngày nhận phản biện 16/11/2018; ngày chấp nhận đăng 21/11/2018

Tóm tắt:

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu về công nghệ luyện và tạo phôi một số mác thép độ bền cao tiên tiến (AHSS) lần đầu tiên tại Việt Nam từ sắt xộp (DRI) MIREX. Sắt xộp, sản phẩm của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp phi cốc, có hàm lượng C thấp, P và S rất thấp, chưa được sử dụng rộng rãi tại Việt Nam do chưa có công nghệ chuyên dụng. Nghiên cứu này bước đầu giải quyết về công nghệ sử dụng sắt xộp luyện thành thép cacbon và hợp kim trong lò cảm ứng dung lượng đến 10 tấn. Đồng thời, một số phôi thép AHSS được luyện từ sắt xộp, có tính chất cơ học đặc biệt như thép S10C, DP800, TRIP800, CrMnSi và được nghiên cứu tích hợp các công nghệ như luyện và tinh luyện thép, biến dạng và xử lý nhiệt cho nhóm thép CMnSi (thép HSLA). Thép được sản xuất có tính chất cơ học tốt, vừa có độ bền cao vừa có tính dẻo tốt, hơn hẳn tính năng thép HSLA. Trong đó, mác thép dập sâu S10C-M đã được thử nghiệm ở hai nhà máy quân đội và được đánh giá đạt yêu cầu kỹ thuật.

Từ khóa: sắt xộp DRI, thép DP, thép độ bền cao tiên tiến AHSS, TRIP.

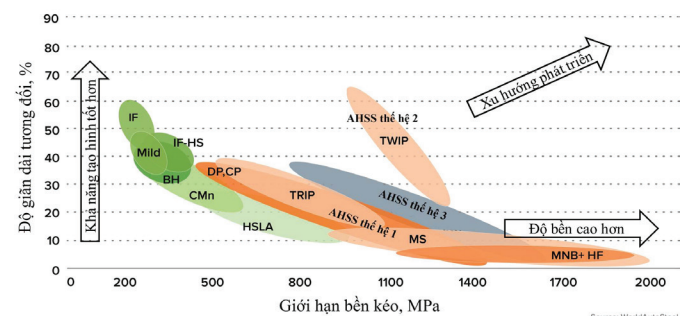
Chỉ số phân loại: 2.5

Đặt vấn đề

Từ cuối thế kỷ XX, ngành luyện kim thế giới đã ứng dụng nhiều công nghệ tiên tiến với định hướng: tăng năng suất, tăng chất lượng, giảm giá thành và thân thiện môi trường. Trong đó, nổi bật là đã ứng dụng công nghệ hoàn nguyên trực tiếp quặng sắt DRI - công nghệ phi cốc, hay công nghệ luyện kim xanh [1]. Do không dùng than cốc làm chất hoàn nguyên, nên sắt xộp có hàm lượng cacbon, tạp chất thấp hơn. Khi tích hợp các công nghệ biến dạng và xử lý nhiệt đã tạo ra nhóm thép độ bền cao tiên tiến AHSS, kết hợp độ bền cao, tính dẻo tốt [2, 3]. Thép AHSS được ứng dụng sản xuất khung dầm ô tô, các cấu kiện thép đã giảm nhẹ khối lượng và giá thành sản phẩm, đang dần thay thế cho một số mác thép HSLA truyền thống [4-6].

Đặc điểm thép AHSS là có thành phần hóa học gồm C, Mn, Si và một ít nguyên tố Cr, Mo, Al gần như HSLA, nhưng có độ sạch tạp chất cao hơn với hàm lượng P, S nhỏ hơn 0,015%. Đồng thời, trong quá trình sản xuất được tích hợp các công nghệ tiên tiến về biến dạng và xử lý nhiệt. Nhờ đó, thép có tổ chức đa pha với tỷ phần thể tích nhất định và

có kích thước hạt đạt siêu mịn, nên thép có cơ tính vừa bền vừa dẻo. Thép AHSS thế hệ 1 gồm các nhóm thép song pha DP, thép chuyển biến do dẻo TRIP, thép phức hợp pha CP, thép mactenxit (hình 1), thép có các chỉ tiêu cơ học cao hơn hẳn thép HSLA; dải độ bền siêu cao từ 500 đến 2000 MPa, độ giãn dài từ 10 đến 40%.



Hình 1. Quan hệ giới hạn bền và độ giãn dài của một số thép và thép AHSS [2].

Ngoài ra, thép còn có tỷ số giới hạn bền trên giới hạn chảy cao, có thể chịu tải biến dạng lớn hơn, hệ số hóa bền

*Tác giả liên hệ: Email: dinhbatru39@gmail.com

Study on the making and heat treatment of some advanced high-strength steels

Ba Tru Dinh^{1,2*}, Van Doan Tran², Thanh Binh Phan²,
Van Hien Dinh³, Cong Thuc Tran⁴,
Van Long Le⁵, Tien An Nguyen⁶

¹Military Technical Academy

²JSC MIREX

³Military Science and Technology Institute

⁴Thaibinh University

⁵Institute of Technology, Ministry of Defense

⁶The Infantry Training Colledge Number 1

Received 16 October 2018; accepted 21 November 2018

Abstract:

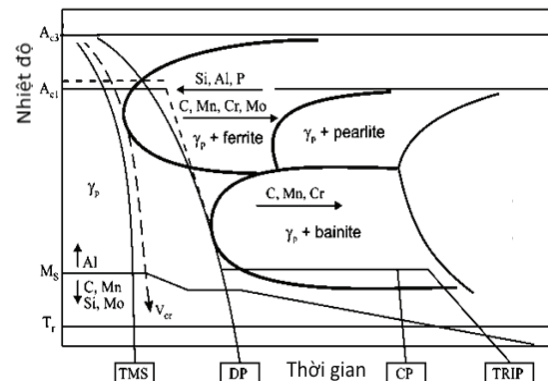
This paper presents the results of a research on the technology of producing some advanced high-strength steels (AHSS) in Vietnam from sponge iron (DRI) of MIREX. Sponge iron which has low C, P, S contents has not been widely used in Vietnam yet. This research, initially, has solved the technology of making the carbon steels and alloys from sponge iron in the induction furnace with the capacity of 10 tons. Some AHSS billets, made from DRI, which have special mechanical properties such as S10C, DP800, and TRIP800 steels have been studied thanks to the integration of such technologies as refining and making, deformation, and heat treatment for the CMnSi steel group. The resulted steels have good mechanical properties, both high durability and plasticity, even better than that of high-strength low alloy (HSLA) steel (CMnSi stell). In particular, the S10C-M deep-drawing steel has been tested in two military plants and shown the satisfaction of technical requirements.

Keywords: advanced high-strength steels (AHSS), DP steel, sponge iron (DRI), TRIP steel.

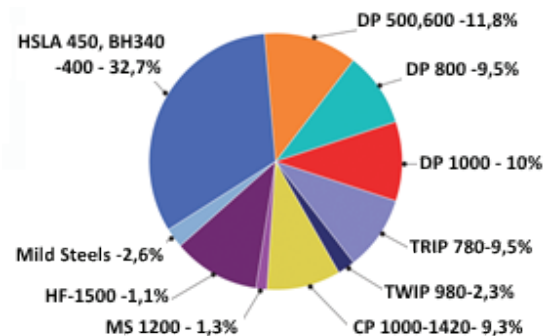
Classification number: 2.5

biến dạng lớn và chỉ số hấp thụ năng lượng cao.

Các cơ tính đạt được như trên, ngoài do thép có độ sạch tạp chất cao, chúng còn được xử lý nhiệt đặc biệt (hình 2), tùy quy trình nguội khác nhau để tạo ra một hỗn hợp các pha khác nhau với tỷ phần pha nhất định tùy mức thép. Đến nay, tỷ trọng khối lượng thép AHSS trong các xe ô tô con đã chiếm đến 70% (hình 3).



Hình 2. Sơ đồ xử lý nhiệt AHSS.



Hình 3. Tỷ phần các mức thép trong ô tô.

Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Từ các kết quả nghiên cứu công nghệ luyện thép các bon và hợp kim từ sắt xốp [7] thấy rằng, sắt xốp là nguyên liệu rất tốt dùng luyện thép chất lượng cao, do hàm lượng tạp chất thấp, có chứa FeO và không khí, nên khi luyện trong lò cảm ứng tạo sự sôi, khuấy đảo đồng đều nước thép, tạo điều kiện khử sâu tạp chất và lưu giữ được các nguyên tố vi lượng có trong quặng, rất phù hợp dùng luyện các mức thép có tính kỹ thuật và kinh tế. Từ các yêu cầu thép phục vụ sản xuất quốc phòng, một số mức thép được chọn để nghiên cứu là: 1) Thép S10C-M dùng dập vỏ liều đạn pháo với yêu cầu có độ dẻo cao nhưng có độ biến cứng lớn; 2) Thép dùng dập vỏ động cơ đạn phản lực, với yêu cầu độ bền rất cao khi làm việc nhưng có độ dẻo lớn để dập vuốt tạo hình; 3) Thép có độ bền siêu cao, chế tạo các chi tiết trong tên lửa và vỏ bọc thép [8].

Nguyên liệu sử dụng là sắt xộp MIREX, được sản xuất dưới dạng cục hoặc vôi viên, có hàm lượng C từ 0,4 đến 1,0%; P và S nhỏ hơn 0,04%, còn lại là FeO và một số tạp chất. Thép được luyện trong lò cảm ứng trung tần 1,5 tấn/mẻ, lò được đầm bằng sạn MgO và thiêu kết bảo đảm tuổi thọ lò. Khi luyện đã sử dụng các công nghệ về điều khiển chế độ điện và nhiệt, công nghệ tạo xỉ và khử tạp chất, công nghệ nạp liệu, hợp kim hóa; tiếp sau được tinh luyện trong lò cảm ứng chân không VIM-300 để tinh chỉnh thành phần, khử sâu tạp chất và khử khí. Thép được đúc thành thời đường kính 250 mm, rèn kết hợp cán thành thép thanh có đường kính đến 25 mm, có khối lượng biến dạng và nhiệt độ dừng rèn để cho độ lớn hạt sau cán là nhỏ nhất. Các mẫu thí nghiệm kéo và phân tích kim tương được nung ở nhiệt độ giữa AC1 và AC3 ($740 \div 790^\circ\text{C}$), giữ nhiệt và làm nguội. Đối với thép song pha DP, làm nguội nhanh trong nước, thép dẻo do chuyển pha TRIP được làm nguội đẳng nhiệt trong bể muối ở $400-450^\circ\text{C}$ (hình 2). Tiếp sau các mẫu được kiểm tra tổ chức, xác định độ lớn hạt và tỷ phần các pha; thử kéo xác định các chỉ tiêu cơ học ở các trạng thái xử lý nhiệt tại Trung tâm Đo lường BQP và được xử lý theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm.

Kết quả và thảo luận

Nghiên cứu tạo phôi mác thép S10C-M

Thép S10C-M là mác thép dùng dập vỏ liều đạn pháo cho hải quân, thay cho hợp kim đồng đất tiền. Kết quả nấu luyện thép trong lò cảm ứng được liệt kê ở bảng 1.

Bảng 1. Thành phần thép S10C-M theo tiêu chuẩn và thép được luyện.

Mác thép	Thành phần hóa học (% khối lượng), trừ Fe								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ni+Cr
S10C-M	0,09-0,11	0,20-0,30	0,40-0,55	$\leq 0,015$	$\leq 0,010$	$\leq 0,3$	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$	$\leq 0,35$
Tiêu chuẩn									
S10C-M-1	0,115	0,26	0,49	0,014	0,011	0,14	0,14	0,24	Mo<0,006
S10C-M-2	0,12	0,31	0,46	0,012	0,010	0,28	0,12	0,23	As<0,009

Như vậy, thành phần hóa học và hàm lượng tạp chất đạt được yêu cầu kỹ thuật, tiêu chuẩn quân sự thép S10C-M. Hàm lượng P và S nhỏ hơn 0,015%, ngoài ra thép còn có Ni và Cr để tăng độ dẻo, có Cu để tăng tính chống ăn mòn khí hậu.

Tiếp theo, phôi được rèn thành đĩa D230 mm dày 14 mm, được xử lý nhiệt và kiểm tra tổ chức tế vi và cơ tính trước khi dập tại nhà máy (như hình 4). Trước mỗi bước dập, phôi được ủ để giảm nhẹ lực dập. Nhiệt độ ủ từ 700 đến 800°C , thép có giới hạn bền $R_m=360$ MPa, giới hạn chảy $R_p=230$ MPa, độ giãn dài trên 35%. Ở trước bước dập

cuối, nhiệt độ ủ trong khoảng $300-350^\circ\text{C}$, giới hạn bền sau ủ đạt 700-760 MPa, sau lần dập cuối cùng, nhờ biến cứng, giới hạn bền có thể tăng trên 800 đến 900 MPa, cuối cùng khử ứng suất dư ở nhiệt độ 180°C trong 10 phút. Nhờ hiệu ứng biến cứng nung, giới hạn bền có thể tăng thêm 50 MPa.



Hình 4. Các bước dập chi tiết.

Kết quả đã được các cơ quan quản lý đánh giá như sau: thành phần hóa học phù hợp với thép Hàn Quốc dùng dập vỏ liều; cơ tính phôi đầu vào đáp ứng yêu cầu dùng dập vỏ liều, nhất là có độ dẻo cao, độ giãn dài tương đối trên 30%; đã dập thử không bị hỏng, phôi thép đạt yêu cầu hình dáng và kích thước vỏ liều; cơ tính vỏ liều đáp ứng yêu cầu bản vẽ thiết kế.

Nghiên cứu tạo phôi thép DP800 và TRIP800 nhóm CMnSi

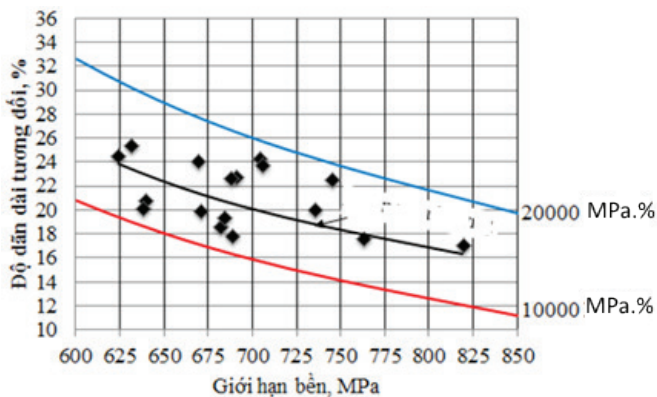
Nghiên cứu được thực hiện nhằm đáp ứng nhu cầu cung cấp phôi thép dùng sản xuất vỏ động cơ và bình cao áp đạn phản lực, thay thế phôi thép phải nhập ngoại. Sản phẩm dạng ống dài (đến 2000 mm), thành mỏng (đến 1 mm) và chịu áp lực cao bên trong, đòi hỏi giới hạn bền rất cao. Hai mác thép có thành phần hóa học sau tinh luyện được mô tả trong bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hóa học của một số mác thép DP và TRIP nghiên cứu.

Mác thép AHSS	Thành phần hóa học (% khối lượng)									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Cu	Al	P	S
DP1	0,098	1,24	0,98	0,34	0,033	0,009	0,050	0,06	0,015	0,012
DP2	0,137	1,41	1,64	0,06	0,070	0,005	0,035	0,041	0,012	0,011
TRIP 1	0,220	1,39	1,60	0,11	0,05	0,003	0,040	0,11	0,011	0,009
TRIP 2	0,234	2,51	2,94	0,72	0,04	0,007	0,070	0,12	0,013	0,004

Thành phần thép DP800 và TRIP800 đáp ứng đủ các yêu cầu dùng dập vỏ động cơ đạn theo tiêu chuẩn ngành. Phôi thép được rèn và xử lý nhiệt đặc biệt như sau:

Mẫu thép DP được nung ở 3 cấp nhiệt độ 740, 760 và 780°C; được giữ nhiệt 10, 15 và 20 phút, làm nguội trong dầu, nước và nước muối. Các chỉ tiêu cơ học được đánh giá theo các tiêu chuẩn quy định. Nhận thấy, độ bền lớn nhất đạt trên 800 MPa với độ giãn dài vẫn giữ mức 16%. Khi độ bền thấp đến 600 MPa, độ giãn dài cao nhất đạt đến 25%, hệ số biến cứng lớn hơn 0,18; chỉ số Rm/Re đạt 1,54; chỉ số hấp thụ năng lượng (tích giới hạn bền với độ giãn dài PSE) đạt đến 18000 MPa.%. Tổng hợp các số liệu thực nghiệm dựng đồ thị quan hệ giới hạn bền và độ giãn dài sau các chế độ xử lý cơ nhiệt (hình 5).

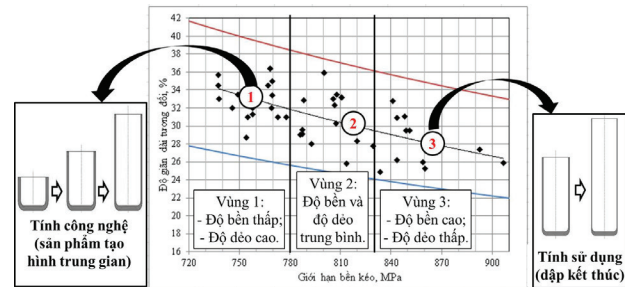


Hình 5. Quan hệ giới hạn bền và độ giãn dài của thép DP và TRIP nghiên cứu.

So với thép HSLA, cơ tính của thép DP800 vừa có độ bền cao vừa có tính dẻo tốt. Nguyên nhân là thép có tổ chức hai pha ferit và mactenxit, trong đó, độ lớn hạt ferit nhỏ, đạt giá trị từ 12 đến 15μm, hạt mactenxit siêu mịn, đạt giá trị nhỏ hơn 8 μm. Tỷ phần pha mactenxit dưới từ 15 đến 30%. Như vậy có thể điều khiển tỷ phần pha mactenxit để không chế quan hệ độ bền - độ giãn dài, tùy theo yêu cầu sử dụng.

Thép TRIP800 nghiên cứu có thành phần C, Mn và Si cao hơn thép DP (xem bảng 4), thép có thành phần pha gồm ferit, bainit, ôstenit dư sau xử lý nhiệt. Tiếp sau, nhờ biến dạng dẻo, ôstenit dư chuyển thành mactenxit. Các bước thực nghiệm được tiến hành như thép DP, nhưng làm nguội trong muối nóng chảy ở nhiệt độ 350 đến 450°C, giữ nhiệt trong thời gian từ 5 đến 15 phút. Kết quả thực nghiệm được trình bày trên đồ thị quan hệ giới hạn bền và độ giãn dài (hình 6). Nhận thấy, có thể phân thành 3 vùng tương ứng với các bộ thông số công nghệ xử lý nhiệt: vùng có độ bền từ 730 đến 780 MPa, nhưng độ giãn dài cao trên 30%, dùng trong trường hợp xử lý phôi ở các bước dập đầu; vùng có độ bền cao từ 830 đến 900 MPa, độ giãn dài từ 20 đến 30%, dùng trong xử lý nhiệt các bước gần cuối và vùng trung gian. Sau bước dập cuối cùng với hiệu ứng hóa bền, biến

dạng giới hạn bền có thể tăng trên 1000 MPa. Nhận thấy, thép TRIP800 có các chỉ tiêu cơ học tốt hơn, có sự phối hợp vừa bền vừa dẻo so với thép DP800, nhưng công nghệ xử lý phức tạp hơn.



Hình 6. Quan hệ độ bền và độ giãn dài thép TRIP.

Bảng 3. Tỷ phần các pha tương ứng với bộ thông số công nghệ xử lý nhiệt.

Phân vùng	Tỷ phần pha (%)			Thông số công nghệ			
	f_a	f_{ab}	f_{vd}	$T_{a+v}^{\circ C}$	τ_{a+v} phút	$T_B^{\circ C}$	τ_B phút
Vùng 1	49-55	40-47	6-10	775-790	11-15	440-450	5-7
Vùng 2	53-62	30-40	6-10	765-780	5-10	350-370	7-10
Vùng 3	59-68	20-26	<10	750-760	5-8	370-400	8-14

Các chỉ tiêu cơ tính của thép DP và TRIP là vừa bền vừa dẻo, có thể giải thích bằng các lý thuyết độ bền. Theo luật trộn pha, độ bền thép DP và TRIP có thể xác định bằng tổng của tích độ bền từng pha với tỷ phần của chúng [9]. Như vậy, bằng cách điều chỉnh độ bền của từng pha, thông qua độ lớn hạt, sự hòa tan các nguyên tố hợp kim, hoặc tạo các pha hợp kim để làm tăng giới hạn bền của từng pha. Đồng thời, có thể điều chỉnh tỷ phần thể tích của từng pha, tìm ra phạm vi biến đổi tối ưu, như thép DP tỷ phần pha mactenxit biến đổi từ 15-30%, còn của thép TRIP, từ bảng 3 ta thấy, vùng 1 dẻo hơn do tỷ phần pha bainit lớn hơn, nhưng đến vùng 3 độ bền cao hơn do tỷ phần pha bainit nhỏ (từ 20 đến 26%). Ngoài ra, có thể giải thích từ lý thuyết lệch, độ lớn hạt nhỏ siêu mịn, nên cơ chế biến dạng dẻo do lệch chuyển động không chỉ xảy ra trong một số hạt mà có sự tham gia của nhiều hạt; do thép sạch, lệch còn có thể truyền gián tiếp qua biên giới siêu hạt sang siêu hạt lân cận hoặc theo biên giới siêu hạt tới các siêu hạt xa hơn.

Chế tạo thép độ bền siêu cao

Để đáp ứng yêu cầu cần mác thép độ bền siêu cao dùng trong một số chi tiết đặc biệt của tên lửa và làm bọc thép, nghiên cứu đã sử dụng công nghệ thép AHSS cho thép 30CrMnSi, có các hàm lượng C, Mn, Si cao hơn so với thép DP và TRIP [8]. Thành phần thép nghiên cứu như tiêu chuẩn GOST, có bổ sung một số nguyên tố vi lượng được kê ở bảng 4.

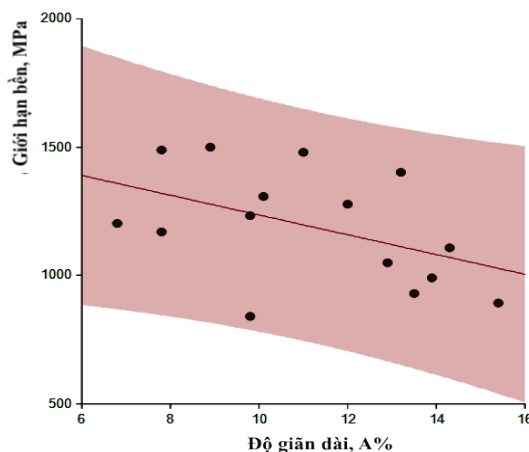
Bảng 4. Thành phần hóa học thép 30CrMnSi theo GOST 4543-71 (% trọng lượng), trừ Fe.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,26-0,35	0,8-1,2	0,8-1,1	<0,3	<0,035	<0,035	0,8-1,1	<0,3
Mức thép nghiên cứu							
0,30	1,0	1,0	0,3	0,015	0,0225	1,0	<0,3

Kết quả xác định chỉ tiêu cơ tính, tương ứng với các chế độ nhiệt luyện, được biểu diễn ở biểu đồ hình 7. Kết quả cho thấy, độ bền của thép có thể đạt trên 1500 MPa, độ giãn dài đạt trên 10%, độ bền nhỏ nhất đạt 1000 MPa, độ giãn dài đạt trên 15%. Ở trạng thái thường hóa, giới hạn chảy là 396 MPa, độ giãn dài 17%, độ co thắt 45%.

So sánh chỉ tiêu cơ học, thép nghiên cứu có giới hạn bền sau tôi 890°C, ram 540°C đạt đến 1229 MPa, độ giãn dài 13%, các chỉ tiêu hơn hẳn cơ tính mức thép cùng loại theo GOST. Khi ram ở 300°C độ bền đạt 1660 MPa, giới hạn chảy đạt 1480 MPa, độ giãn dài 11%, độ bền đạt giá trị siêu cao ngang thép mactenxit, nhưng vẫn giữ độ giãn dài trên 10%. Có thể thay đổi thành phần cacbon để tăng hàm lượng mactenxit trong thép, để đưa giới hạn bền của thép lên đến 2000 MPa.

Như vậy, thép độ bền siêu cao họ 30CrMnSi có thể sử dụng công nghệ xử lý nhiệt mới để nâng cao các chỉ tiêu bền và chỉ tiêu dẻo, theo công nghệ thép tiên tiến.

**Hình 7. Biểu đồ quan hệ độ giãn dài và độ bền thép 30CrMnSi nghiên cứu.**

Kết luận

Trên cơ sở làm chủ được công nghệ luyện thép hợp kim từ sắt xốp trong lò cảm ứng với các quy trình công nghệ xây và đầm lò, quy trình công nghệ luyện thép với việc điều khiển chế độ nhiệt, chế độ điện, tốc độ nạp liệu, xử lý xỉ...

được xây dựng hợp lý, đã luyện được các mức thép dùng trong quân sự với các yêu cầu khắt khe về thành phần hóa học, nhất là hàm lượng P và S, mở ra cơ hội sản xuất các loại thép phục vụ quốc phòng bằng công nghệ nội địa.

Thép dùng trong quốc phòng, ngoài yêu cầu thành phần hóa học, cần sử dụng các công nghệ xử lý đặc biệt để tạo nên thép có tổ chức pha và tỷ lệ các pha nhất định, thông qua điều khiển các thông số công nghệ để tạo sự phối hợp giữa độ lớn hạt, độ bền, độ dẻo của các pha và tỷ lệ của chúng nhằm kết hợp hài hòa giữa giới hạn bền và độ giãn dài của các mức thép.

Đã xác định được công nghệ để sản xuất phối các phối thép: thép S10C-M dùng đập vỏ liều đạn pháo, được thử nghiệm trên dây chuyền công nghệ, có thể đưa sản xuất loạt nhỏ. Thép DP800 và TRIP800 đã nấu luyện, gia công biến dạng và xử lý nhiệt đặc biệt, đưa ra được quy luật quan hệ giữa các chỉ tiêu cơ học với các thông số công nghệ. Có thể lựa chọn các thông số công nghệ để cho cơ tính của thép phối hợp hài hòa giữa độ bền và độ dẻo, tùy theo các giai đoạn công nghệ và yêu cầu của quy trình. Thép 30CrMnSi được ứng dụng công nghệ xử lý nhiệt theo thép độ bền cao tiên tiến AHSS, đã cho độ bền rất cao, đáp ứng các yêu cầu làm các chi tiết chịu lực lớn trong vũ khí và xe quân sự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] www.midrex.com.
- [2] www.WorldAutoSteel.org.
- [3] M.Y. Demeri (2013), *Advanced High-Strength Steels-Science, Technology, and Application*, ASM International.
- [4] www.reportlinker.com/automotive/reports.
- [5] Majid Pouranvari (2010), *Tensile strength and ductility of ferrite-martensite dual phase steels*, Islamic Azad University.
- [6] Wolfgang Staufner (Feb. 19th, 2003), *Great Designs in Steel - Advanced High-Strength Steels in Mercedes-Benz Passenger Cars*, Daimler Chrysler - Germany.
- [7] Nguyễn Ngọc Linh, Nguyễn Thanh Bình, Trần Văn Đoàn, Đinh Bá Trụ (2012), “Các kết quả nghiên cứu ứng dụng về sản xuất sắt xốp MIREX và thép hợp kim”, *Tuyển tập Báo cáo Hội nghị cơ khí toàn quốc lần thứ 3*.
- [8] Mazhyn Skakovand Gulzhaz Uazyrkhanova, Natalya Popova, Michael Sheffler (2013), *Influence of Deformation on the Phase-Structural State of Steel 30CrMnSi*, www.scientific.net/AMR.601.69.
- [9] Z. Fan, P. Tsakiroopoulos, A.P. Miodownik (1994), “A generalized law of mixtures”, *Journal of Materials*, **29**, pp.141-150.