



Structural and Physical-Mechanical Researches on Wear-Resistant Steels Produced by Centrifugal Metal Cast Method

Christo ARGIROV, Ivan GEORGIEV

Bulgarian Academy of Science, Institute of Metal Science, Equipment, and Technologies
with Center for Hydro- and Aerodynamics “Acad. A. Balevski”, Sofia, Bulgaria,
e-mails: h.argirov@ims.bas.bg, ivan_georgiev@abv.bg

Abstract:

Pipes of wear-resistant steels are produced by centrifugal metal cast method. The obtained cast pipes from high-temperature steels additionally alloyed with niobium and nitrogen have higher strength characteristics at short strength test at high temperatures. Structural investigation of the steels is carried out. It is established that radial laying macrostructure and formed microstructure guarantees high operating live-time of the products. It is proved that heat and thermo mechanical treatments additionally improve on the hardness, the wear-resistant and the resistant to chemical aggressive mediums. Optimum regimes for heat and thermo mechanical treatments (ionic nitriding) of the investigated alloys guaranteed reliable work in the operating conditions are defined.

Keywords: centrifugal metal cast method, wear resistant steels, structural researches

Структурни и физико-механични изследвания на износоустойчиви стомани, произведени по метода на центробежното металолее

Христо АРГИРОВ, Иван ГЕОРГИЕВ

1. Увод

Продължителната експлоатация на машинни детайли или тяхната дълготрайност е свързана с износоустойчивостта на материала, от който те са изработени. Износването на машинните части може да бъде предизвикано от триенето на механическите детайли, от въздействието на работната среда-потока течност или газ, от надраскването на твърдите частици върху повърхността на детайлите и от други повърхностни процеси. Механизмът на износване по същество е различен и зависи от условията на износването. Състои се основно в откъсване на малки частици от повърхността на метала. При обикновено триене повърхността на метала се наклепва и съпротивлението срещу износване нараства. Следователно, в този случай способността на метала към наклеп в съществена степен определя неговата износоустойчивост. При абразивно износване, когато твърдите частици на абразива (например, пясък) откъсват дребни късове от метала, устойчивостта срещу износване се определя от съпротивлението на метала към крехко разрушаване и от неговата твърдост. При наличие на агресивни среди съпротивлението срещу износване зависи и от корозионната устойчивост на материала. Затова износоустойчивостта на сплавта се определя от физико-химичните свойства на материала и от условията на износването. Устойчивостта срещу абразивно износване нараства с увеличаване на твърдостта на износвания материал, но в различна степен за различни материали. Затова ефективно увеличаване на износоустойчивостта се постига чрез повърхностно закаляване или чрез другите методи за повишаване на повърхностната твърдост (цементация, азотиране и други). При еднаква повърхностна

твърдост стоманите със структура мартензит+карбиди притежават по-голяма износоустойчивост в сравнение със стоманите със същата твърдост, но не притежаващи достатъчно карбиди.

При еднаква твърдост стомана с крупнокристалическа структура има по-малка износоустойчивост в сравнение със стомана с дребнокристалическа структура, тъй като при първата съпротивлението към крехко разрушаване е по-малко. От друга страна, графитните включения, които влошават механичните свойства на стоманата, повишават износоустойчивостта при триене, тъй като в процеса на износването същите излизат на повърхността на триенето, разрушават се по плоскостите на спояването, образувайки тънки пластинки и запълват неравностите на триещите се повърхности. По такъв начин предотвратяват сухото триене на метал в метал и свързването. Или с други думи графитните включения изпълняват ролята на смазка. Най-известни иносоустойчиви стомани са графитизираните стомани със съдържание на въглерод 1,30-1,75 % и силиций 0,70-1,60 %, като графитът в структурата се получава за сметка на частичното разлагане на цементита и високомангановата стомана (хадфилдова стомана) [1].

Износоустойчивостта е свойство на металите и сплавите да се съпротивляват на повърхностно разрушаване под действието на външно натоварване. То се определя от условията на натоварване и от структурата на материалите. В зависимост от условията на работа износоустойчивостта може да бъде абразивна и хидроабразивна. При абразивно износване тя нараства с увеличаване на твърдостта, като при равни обеми твърдост възникват високи натискови напрежения. В условията на химически агресивни материали, при интензивно триене и средна пластична деформация на работния слой износоустойчивостта може да се постигне чрез използване на стомана с въглеродно съдържание около 1% и хром до 18%. Износоустойчивостта на металите и сплавите зависи съществено от структурата им: първоначална и тази формираща се в резултат на процеси, протичащи при триенето, т.е. фактическите свойства на тънкия повърхностен слой в процеса на взаимодействие с работната среда. Най-ниска износоустойчивост имат сплави с феритна структура, като с появата на перлит тя расте. Най-висока износоустойчивост притежава мартензитът, но той е с ниска жилавост. Други фактори влияещи върху износоустойчивостта на сплавите са структурните съставни, предимно карбиди, нитриди, карбонитриди, бориди, оксиди и други. Износоустойчивостта зависи както от количеството на структурните съставни, така и от техния вид, форма, големина, дисперсност, разположение и връзка с основната матрица.

Един от утвърдените начини за подобряване на високотемпературната устойчивост на сплавите е чрез легиране, т.е. употреба и добавяне на легиращи елементи за уякчаване на твърдия разтвор. Структурно представлява внедряване на чужди атоми в кристалната решетка, което предизвиква локални деформации на решетката, възпрепятстващи високотемпературните деформации. Това обикновено се осъществява чрез добавяне на легиращи елементи като волфрам, ниобий, кобалт, азот, подобряващи якостта на сплавите. Размерът на зърната оказва съществено влияние върху продължителната якост на сплавите при високи температури. За разлика от деформируемите сплави, размерът на зърната при сплавите, получени чрез леене, в частност по метода на центробежното металолеене, е по-голям, в следствие на което се подобрява устойчивостта срещу разрушаване [2, 3].

В материалознанието се използват различни методи на изследване и изпитвания, необходими за получаване на достатъчно пълна и надеждна информация за свойствата на стоманите и за тяхното изменение в зависимост от химичния състав, структурата и обработката [4]. Тези методи може да се разпределят в следните две групи:

Методи, с помощта на които се определят строежът и превръщанията, протичащи в стоманите и променящи техния строеж. Те се разделят, както следва:

а) методи, използването на които позволява непосредствено да се наблюдава или определя строежът на материалите. Те се наричат структурни. Към тях спадат методите на макроскопическото (макроанализ), микроскопическото изследване (микроанализ) и други;

б) методи, основани върху съществуващата връзка между строежа и свойствата на материалите. Те позволяват косвено, по изменението на физичните свойства, да се съди за превръщанията, протичащи в металите при тяхната обработка и въздействащи на тяхната структура: топлосъдържание (термичен анализ), коефициенти на топлинното разширение и на изменение на обема (дилатометричен анализ), електросъпротивление и някои химични и механични свойства.

Методи, използването на които позволява непосредствено да се определят свойствата на материалите, изисквани при условията на експлоатация, преди всичко механичните, както и физичните и химичните.

Структурните методи намират широко приложение за изследване на металите. Основното им предимство се състои в това, че между структурата на метала и неговите свойства в повечето случаи съществува достатъчно надеждна качествена зависимост. Това позволява по данните на макроанализа да се определи в какво направление се изменят механичните, физичните или химичните свойства при изменения в структурата и да се обяснят причините за тези различия в свойствата. Освен това, по данните, получавани чрез тези методи, е възможно да се определят средствата за ефективно подобрене на структурата, а следователно и на свойствата на стоманата. Данните, получавани чрез структурните методи, имат само качествен характер и не позволяват да се получат количествени сведения за свойствата.

Цел на настоящата работа е експериментално изследване в лабораторни условия на процеса на центробежно формообразуване на тръбни заготовки от високо топлоустойчиви и износоустойчиви сплави. Изследване на макро- и микроструктурата на произведените сплави, на якостта при нормални и повишени температури за прогнозиране на устойчивостта на сплавите в реалните условия на експлоатация.

2. Експериментална част

За целите на настоящото изследване на инсталация за центробежно металолееене са произведени различни марки износоустойчиви стомани (Таблица 1).

Таблица 1. Химичен състав на стоманите, тегловни %

Марка стомана	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	S,P
38CrMoAl	0,41	0,65	0,25	1,58	0,53	-	-	0,020 0,016
35CrMnMoNi2	0,34	0,93	0,10	0,85	0,41	-	1,9	0,015
Cr12	1,89	0,34	0,25	12,40	-	0,01	0,30	0,016 0,014
Cr12WV	1,94	0,41	0,24	12,30	-	0,23	0,24	0,017 0,019
Cr12Mo	1,63	0,32	0,30	11,62	0,45	0,23	0,25	0,022 0,025
Cr5MoV	0,88	0,72	0,26	4,83	0,67	0,28	0,14	
9Cr18	0,94	0,65	0,45	17,87	-	-	-	0,021 0,017

Забележка: ст. 38CrMoAl: 0,95 % Al; ст. Cr12: 0,19% W; ст. Cr12WV: 0,76 % W.

Металната стопилка с определен химичен състав и необходимото количество е получена в индукционна пещ, синтерована с основна набивна маса RB10. За получаване на качествена стопилка е легирано с нисковъглероден ферохром FeCr 006 и високолегиран ферохром FeCr 800 А, а разкисляването-с разчетни количества 75% фиросилиций. Тръбните заготовки са изследвани чрез безразрушителен контрол съгласно БДС EN 13018 [5, 6]. Получените резултати съответстват на стандартите. От получените отливки са изработени пробни образци за металографски изследвания, за механични изпитвания и за изследване на износоустойчивостта. Представени са получените експериментални резултати на някои от изследваните марки износоустойчиви стомани.

2.1. Стомана 38CrMoAl

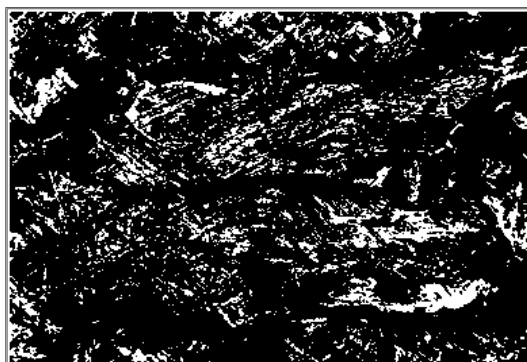
Чрез метода на центробежно металолеење са произведени експериментални заготовки от стомана 38CrMoAl. Определен е химичният състав на отливките по стандартни методики, като резултатите са представени в Таблица 2.

Таблица 2. Химичен състав на отливки от стомана 38CrMoAl

Химичен състав, тегл. %							
№ отл.	C	Mn	Si	Cr	Al	S	Mo
1	0,39	0,70	0,30	1,59	0,80	0,030	0,40
2	0,38	0,69	0,40	1,61	0,70	0,032	0,39
3	0,40	0,69	0,42	1,56	0,82	0,028	0,42
4	0,38	0,73	0,36	1,59	1,03	0,027	0,37

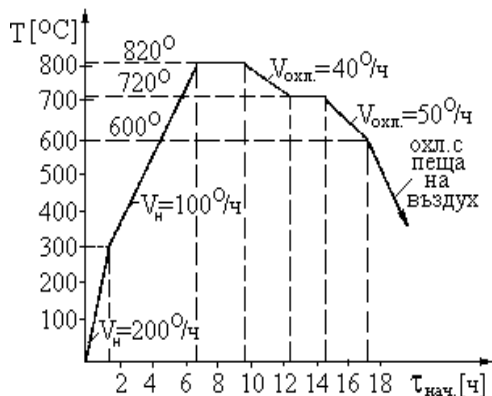


Фиг. 1. Макроструктура на центробежно лята заготовка от ст. 38CrMoAl



Фиг. 2. Микроструктура на центробежно лята заготовка от ст. 38CrMoAl

След изследване и анализ на макро- и микроструктурата на произведените заготовки (Фигури 1, 2) е установено, че цялото сечение е изградено от насочени кристали, в които се наблюдават и малко равноосни кристали. Основната матрица е ферито-перлитна, като в изолирани участъци се наблюдават мартензитни игли с твърдост от порядъка на HV=400. Това налага допълнителна термична обработка-отгряване на отливките с цел снемане на вътрешните напрежения и подобряване на тяхната механична обработваемост. Отгряването е проведено по термичен режим, показан на Фигура 3.



Фиг.3. Термичен режим за отгряване



Фиг.4. Микроструктура след йонно азотиране

Извършени са допълнителни изследвания за йонно азотиране на повърхностния слой. За целта са изработени пробни образци, които са подложени на този вид обработка. Получените резултати от металографското изследване са показани на Фигура 4. Установено е, че външният слой се състои основно от ϵ фаза (Fe_2N) с дълбочина на проникване около 23 μm и твърдост по Викерс $HV=1200$ и от други фази. На дълбочина до 1mm твърдостта е $HV=910 \div 970$, след което твърдостта на ферито-перлитната матрица се запазва постоянна в останалата част от сечението.

Изследвани са механичните свойства на стомана 38CrMoAl: $R_m, R_{0.2}$, МПа; A_5 , % и KCU , MJ/m^2 при температури 20° С, 200 ° С и 320 ° С. Получените резултати от механичните изпитвания са представени в Таблица 3.

Таблица 3. Механични свойства на стомана 38CrMoAl

№ по ред	МЕХАНИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ									KCU, MJ/m^2 20°С
	R_m , МПа			$R_{0.2}$, МПа			A_5 , %			
	20°С	200°С	320°С	20°С	200°С	320°С	20°С	200°С	320°С	
1	1100	1010	1010	860	890	850	3,6	3,6	6,7	1,00
2	1080	1010	900	870	870	810	4,6	10	9,3	1,68
3	730	710	720	340	340	340	10	11	9	2,25
4	1050	1000	970	850	860	840	3,3	4,5	4,5	0,80

Направени са сравнителни изследвания на центробежно ляти заготовки и такива от валцован прокат от стомана 38CrMoAl. Установено е, че якостните характеристики на отливките са по-високи в сравнение с тези на проката. Относителното удължение при отливките е по-ниско, а ударната жилавост-по-висока. Получените резултати от тези изследвания определят необходимостта от допълнителна термична обработка на отливките с цел подобряване на пластичните им свойства.

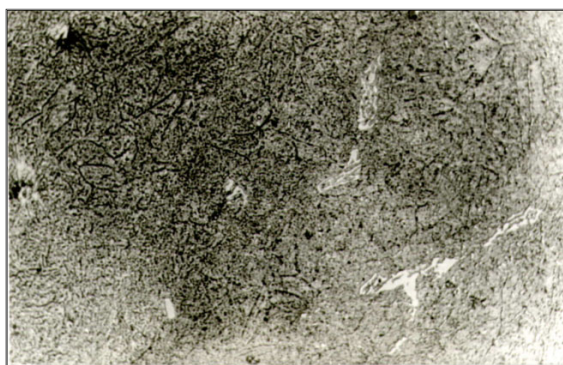
Изследвана е абразивната износоустойчивост на пробни образци от отливките след йонно азотиране. Износването е измерено тегловно с точност 1×10^{-5} g. Относителната износоустойчивост е определена от зависимостта

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta Q_{et} \rho_{pr}}{\Delta Q_{pr} \rho_{et}}, \quad (1)$$

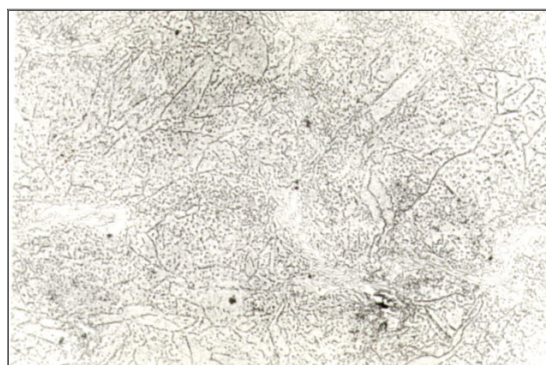
където ΔQ_{et} -износване на еталона [g]; ΔQ_{pr} -износване на пробата [g]; ρ -относително тегло на пробата и еталона [g/mm^3]. Относителното износване на образците след йонно азотиране е 2,96.

2.2. Стомана 9Cr18

Изследвано е формообразуването на дебелостенни заготовки от стомана 9Cr18 с размери $\varnothing 215/\varnothing 150L=1000\text{mm}$, отгряти при температурен режим съгласно Фигура 3. Микроструктурата е анализирана в лято състояние и след термична обработка. В лято състояние тя се състои от първични дендрити, аустенит и евтектика със скелетообразна форма, разположена по границите на зърната. Оценката на замърсеността на стоманата е направена по стандартни бални таблици. Наблюдават се оксидни включения (бал 3), сулфиди (бал 0,5) и единичен хромов шпинел. Изследванията на пробните образци са проведени след следната термична обработка: предварително подгряване до 850°C в солна вана, нагряване до температура 1040°C в разтвор от бариев хлорид (BaCl_2) и охлаждане в масло. Закалените образци се подлагат на нискотемпературно смекчаващо отгряване при $160\div 180^{\circ}\text{C}$. Структурата на закалените образци (Фигура 5) е скрит дребнозърнест мартензит и вторични карбиди с наличие на остатъчен аустенит и неразтворени първични карбиди. Наблюдаваните карбиди имат преобладаващ размер средно $2,2\ \mu\text{m}$, а разстоянието между тях е от порядъка на $5\ \mu\text{m}$.



Фиг. 5. Микроструктура на закалени образци



Фиг.6. Микроструктура след трикратна термична обработка

Експериментално е проведена трикратна термична обработка в температурния интервал $800\div 1040^{\circ}\text{C}$, като са установени структурни изменения на ледебуритната евтектика и подобряване на дисперсността на карбидите и хомогенността на структурата (Фигура 6). Преобладаващият размер на карбидите е $0,63\div 1,8\ \mu\text{m}$ (средно $1,52\ \mu\text{m}$), или има издребняване на карбидите с до 80%. Разстоянието между карбидните зърна е намалено двукратно и е около $2,5\ \mu\text{m}$. Проведени са механични изпитвания по стандартни методики, като получените резултати са представени в Таблица 4.

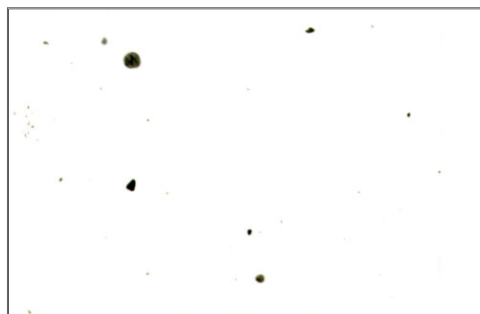
Таблица 4. Механични показатели след трикратна термична обработка

№ по ред	Химичен състав, тегл. %						Механични показатели			
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Rm MPa	R0,2 MPa	A5, %	HRC
1	0,98	0,35	0,55	18,11	0,021	0,020	916	567	5,4	55
2	0,90	0,60	0,47	17,47	0,020	0,020	963	622	4,2	57
3	0,94	0,46	0,27	17,46	0,021	0,018	952	682	4,6	57
4	0,94	0,52	0,68	17,49	0,025	0,019	1047	720	–	61
5	0,90	0,45	0,80	17,88	0,024	0,020	983	627	4,9	58
6	0,89	0,47	0,69	17,80	0,020	0,018	1066	727	–	61
7	0,90	0,45	0,38	18,02	0,022	0,019	1097	770	–	60
8	0,90	0,62	0,60	17,78	0,024	0,017	1027	710	6,2	60

На Фигури 7 и 8 са представени получените резултати от оценката на замърсеността на стоманата: екзогенни неметални включения и оксидни и оксисулфидни неметални включения.



Фиг.7. Екзогенни неметални включения



Фиг.8. Оксидни и оксисулфидни неметални включения

Образуваната структура на стомана 9Cr18 е с висока износоустойчивост и химична устойчивост при експлоатация. Трикратната и конвенционалната термични обработки са определящ фактор за получаване на структура, гарантираща висок експлоатационен ресурс на заготовките и икономическа целесъобразност.

3. Изводи

Произведени са тръбни заготовки от различни марки износоустойчиви стомани чрез метода на центробежното металолееие. Получените лети тръбни заготовки от топлоустойчиви стомани, допълнително легирани с ниобий и азот, имат по-високи якостни показатели при изпитване на кратковременна якост при повишени температури. Проведени са структурни изследвания на стоманите. Установено е, че радиално насочената макроструктура и формираната микроструктура гарантират висок експлоатационен ресурс на изделията. Доказано е, че термичната и химико-термичната обработка допълнително подобряват твърдостта, износоустойчивостта и устойчивостта към химични агресивни работни среди. Определени са оптимални режими на термична и химико-термична обработка (йонно азотиране), гарантиращи надеждна работа в условията на експлоатация. Уякчаването на базовата матрица при високи температури се постига чрез допълнително легиране с ниобий, волфрам, титан и азот.

Благодарности:

Изследването е частично финансирано по проект Център за върхови постижения „Национален център по мехатроника и чисти технологии“ по ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014-2020“.

Литература

1. Гуляев А. П. „Металловедение”. Москва, Металлургия, 1978. 503-504.
2. Геллер Ю. А. Инструментальные стали, Москва, Металлургия, 1983.
1. Георгиев И. С. Н. Станев. Центробежно леене-формообразуване и кристализация. Научни известия на НТСМ. Сборник доклади. Международна конференция „Дни на безразрушителния контрол 2012“, XX, бр. 1 (133), 2012, 178-182, ISSN 1310-394.
3. Геллер Ю. А., А. Г. Рахштадт. Материаловедение. Москва. Металлургия. 1975, 447.
4. Мирчев Й.Н., К.Х. Калчевска, М.М. Миховски, А.А. Туцова. Физически основи, методи, материали и средства за капиларен безразрушителен контрол, 2019г. Формат 160x230, pp. 140. ISBN 9f/ud78-619-90662-2-5.
5. Калчевска К. Х., Й. Н. Мирчев, М. М. Миховски. Физически основи, методи, средства и технологии за визуално-оптичен и измерителен безразрушителен контрол. София, 2020, Издателство на БАН „Проф. М. Дринов”. ISBN 978-619-245-038-0. pp. 144.