

Volumske spremembe med strjevanjem nodularne litine

Shrinking of Ductile Iron during Solidification

V. Uršič, *Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana*
in

M. Tonkovič-Prijanovič, R. Jud, *BELT Črnomelj*

Pri večjih poizkusnih ulitkih iz redne proizvodnje smo ugotavljali vpliv trdnosti forme in vpliv poteka strjevanja litine na pojav nekaterih specifičnih livarskih napak. Ugotovili smo, da se bolj toga forma med strjevanjem nodularne litine manj podaja in s tem preprečuje širjenje litine. Napajalni tlak je zato usmerjen proti notranjosti ulitka, zaradi česar se zmanjšuje možnost nastanka mikroporoznosti in lunke. Nadalje smo ugotovili, da lahko s pravilnim napajanjem ulitkov in z uporabo ustreznih hladilnih teles zagotovljamo usmerjeno strjevanje, tako da so ulitki tudi zaradi tega bolj zdravi. Na avstrijskem livarskem inštitutu v Leobnu smo izvedli vrsto laboratorijskih poizkusov, pri katerih smo ugotavljali obseg krčenja in širjenja nodularne litine v odvisnosti od njene kemijske sestave. Litine, ki so bile močnejše legirane, so se med strjevanjem bolj krčile in so bile bolj nagnjene k lunčanju.

Several experiments in foundry were carried out to determine the influence of mould hardness and crystallization on appearance of specific defects. It was found out that higher rigidity prevents the sinking of mould walls during the solidification of ductile cast iron. Therefore the feeding pressure is directed to the inner sections of casting and shrinkage does not occur. Furthermore it was found that directional solidification could be achieved by using proper feeders and chills in critical positions. We carried out several measurements in OGI, Leoben Austria, to determine the influence of chemical composition on the extent of contraction and expansion of ductile cast iron during its solidification. It was found out that highly alloyed cast irons are very susceptible to the shrinking.

1 Uvod

Med strjevanjem in ohlajanjem ulitkov iz sive litine se pojavlja krčenje in širjenje litine. Do krčenja prihaja med kristalizacijo primarnega in eutektičnega austenita, širjenje pa je posledica izločanja grafita. V primeru nodularne litine je krčenje zaradi drugačne morfologije strjevanja kot pri litini z lamelastim grafitom, občutno večje od širjenja. Za doseganje zdravega ulitka je zato potrebno ustrezno napajanje. Rezultati številnih raziskav pa po drugi strani kažejo, da je odločujoča tudi trdnost, oziroma togost forme, ki se v času strjevanja ulitka ne sme podajati, tako da se usmerjata napajalni tlak in z njim povezan napajalni tok proti kritičnim delom ulitka in dovajata talino v še nestrjene dele ulitka.

V livarni Belt želijo spoznati dogajanja med njenim strjevanjem, ugotoviti vzroke za značilne napake v ulitkih in se jim izogniti. Izvedli smo preiskave na ulitku, pri katerem najpogosteje prihaja do mikroporoznosti in lunčanja¹. Svoje delo smo načrtovali tako, da smo upoštevali dosedanje ugotovitve avtorjev, ki že dalj časa raziskujejo na tem področju²⁻¹¹.

2 Delo

2.1 Preiskovani ulitek in tehnologija ulivanja

V livarni smo se odločili, da bomo za naše delo ulivali in preiskovali vztrajnik z zunanjim premerom 475 mm in maso 40,0 kg, skupaj s prilitki pa okoli 53 kg. Ulivajo ga v formo iz bentonitne pečene mešanice in oblikovane na

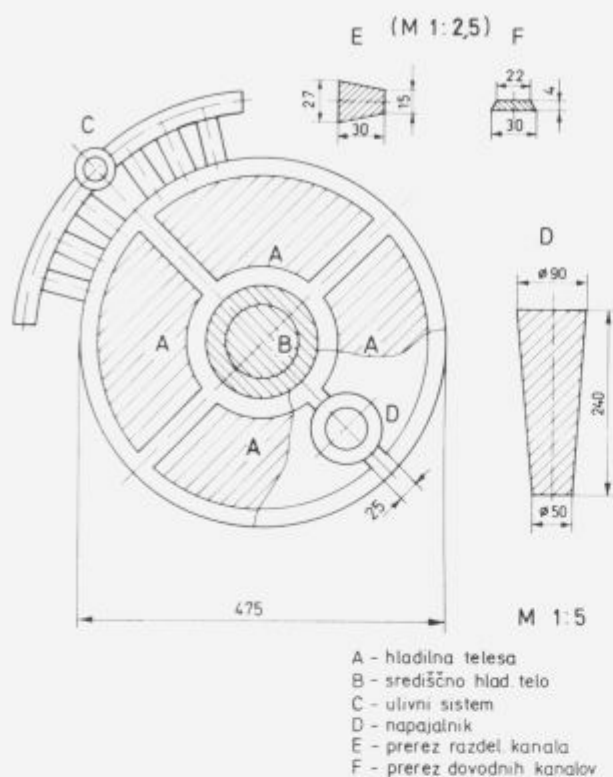
individualnem formarskem stroju. Ulitek v formi leži na osnovni ploskvi in do njega je speljan krožni (80-stopinjski odsek) razdelilni kanal s šestimi dovodnimi kanali, (slika 1).

Zaradi zagotavljanja ustrežnejšega hlajenja in strjevanja ulitka v različno debelih prerezi, uporabljajo po pet hladilnih teles, ki jih zaformajo tik pod steno—dno spodnje polovice livne votline. To je tudi razlog, da izdelujejo forme individualno, saj lahko tako hladilna telesa med polnjenjem okvira vstavljajo ročno. Masa posameznega hladilnega telesa je 4,6 kg. Napajanje poteka zaenkrat s pomočjo enega samega, odprtega napajalnika, postavljenega nasproti ulivni čaši. Njegova prostornina je približno 170 cm³ in masa okoli 12 kg.

Ulili smo pet serij ulitkov (oznake 4, 5, 7, 8, 9), ki so se med seboj razlikovale po kemijski sestavi, trije vzorci, ki so sestavljali posamezno serijo pa so se med seboj razlikovali glede na livarsko tehnologijo:

- prvi ulitek je bil ulit brez napajalnika in hladilnih teles, (vzorci so označeni samo s številko serije),
- drugi ulitek je bil napajan z enim napajalnikom, nismo pa uporabili hladilnih teles (vzorci so označeni s številko serije in črko S),
- tretji ulitek je bil ulit z napajalnikom in s hladilnimi telesi, po že doslej vpeljani tehnologiji v naročnikovi livarni (vzorci so označeni s številko serije in s črkama S in K).

Vzorci serij 5, 7, 8 in 9 so bili uliti v forme iz bentonitne



Slika 1. Načrt preiskovanega ulitka¹: A, B—hladilna telesa, C—ulivni sistem, D—napajalnik.

Figure 1. Scheme of Test Casting: A, B—Chills, C—Gating system, D—Feeder.

peščene mešanice, vzorci serije 4 pa v forme iz peščene mešanice, vezane s furansko smolo.

2.2 Kemijska sestava litin

Kemijska sestava litin, iz katerih so bili uliti poizkusni ulitki, je podana v tabeli 1.

Koncentracija ogljika, silicija, mangana, žvepla in magnezija je bila v vseh primerih identična, razlika je le v količini treh legiranih elementov—bakra, niklja in molibdena, ki vplivajo na morfologijo strjevanja nodularne litine.

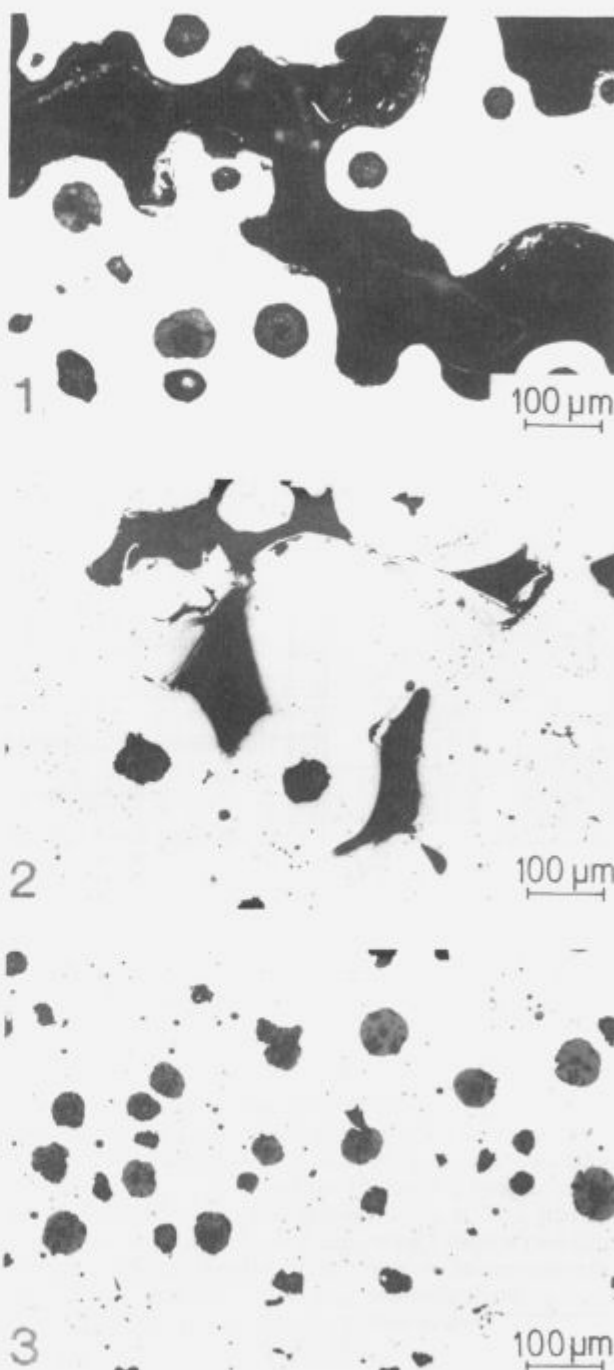
2.3 Razrez poizkusnih ulitkov in makroskopski pregled vzorcev

Iz ulitkov smo radialno izrezali manjše vzorce za podrobnejšo preiskavo. Trdota ulitkov je bila taka, da je bil možen razrez vseh ulitkov, razen dveh vzorcev iz serije 9 (z oznako 9 in 9 S). Po prerezu je poizkusni ulitek, vztrajnik, sestavljen iz treh različno debelih delov—iz pesta, srednjega nosilnega dela in zunanega venca. Notranji lunker in mikroporoznost se najpogosteje pojavljata na treh mestih, ki smo jih označili z 1, 2 in 3 (slika 2).

Makroskopski pregled je pokazal, da se najizrazitejši notranji lunker in mikroporoznost pojavljata v ulitkih iz serij 7 in 8, to je pri najbolj legiranih litinah, ki sta bili uliti v forme iz peščene mešanice, vezane z bentonitom. Izrazit lunker je bil v ulitkih, ki so uliti brez napajalnika in hladilnikov predvsem v področju 1, kjer je najmasivnejši prerez. V ulitkih, ki so bili uliti samo z napajalnikom, večje poroznosti pri

makroskopskem pregledu ni bilo opaziti. V ulitkih, ki so bili uliti z napajalnikom in hladilniki, pa se je lunker pomaknil v področje 2—najtanjši, srednji del ulitka (serije 4, 5, 8 in 9).

2.4 Metalografski pregled vzorcev



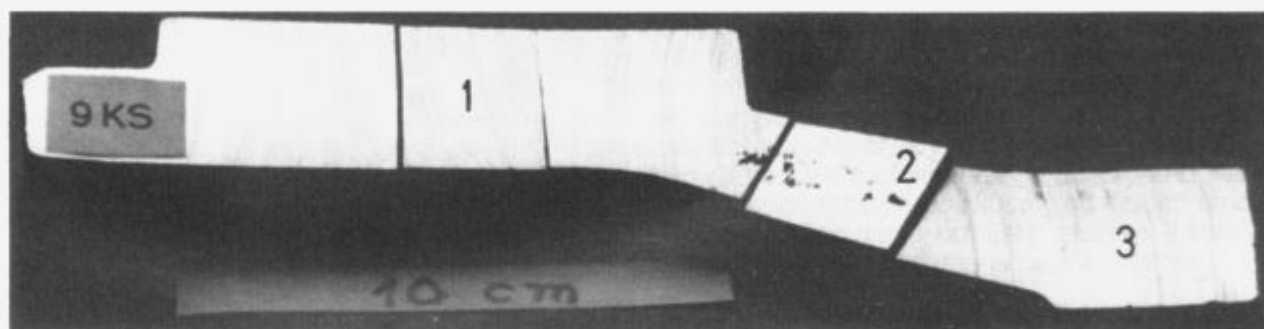
Slika 3. Mikroposnetki vzorca 7 iz področij 1, 2, 3,¹ (nejedkano).

Figure 3. Mikrostructure of sample 7 in Regions 1, 2, 3, (unetched).

Podrobneje smo pregledali vzorce iz serij 5, 7 in 4. Litina iz serije 5 je bila legirana samo z bakrom, litina iz serije 7

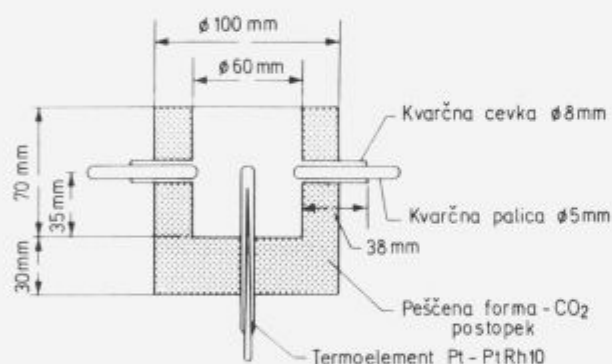
Tabela 1. Kemijska sestava za poizkusne ulitke (mas.%)¹.

Ser.	C	Si	Mn	S	Cu	Ni	Mo	Mg
4	3.75	2.39	0.37	0.009	0.05	0.17	0.003	0.040
5	3.75	2.39	0.32	0.005	0.26	0.08	0.003	0.033
7	3.75	2.48	0.32	0.006	0.15	1.86	0.320	0.033
8	3.75	2.45	0.32	0.010	0.16	1.84	0.360	0.037
9	3.75	2.47	0.32	0.006	0.15	1.26	0.340	0.030



Slika 2. Prerez preiskovanega ulitka s tremi področji¹.

Figure 2. A Section of Test Casting with three Regions.

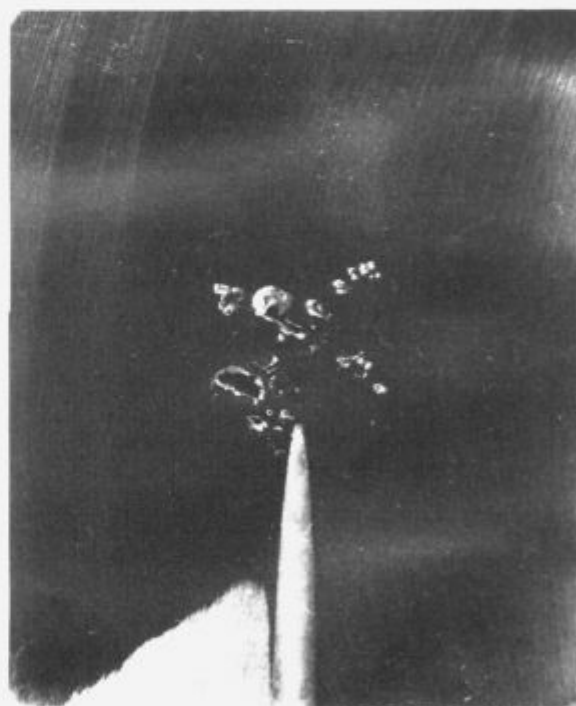


Slika 4. Naprava za merjenje krčenja in širjenja litine med strjevanjem in za zasledovanje ohlajanja².

Figure 4. Sample mould for determination of cooling and of dilatation curves (schematic).

pa je bila sorazmerno močno legirana z nikljem in molibdenom. Obe litini sta bili uliti v forme iz bentonitne peščene mešanice. Litina iz serije 4 je bila nelegirana in ulita v formo, utrjeno s furansko smolo. Vzorce smo izrezali iz področij 1, 2 in 3. Pregledali smo jih v nejedkanem in jedkanem stanju. Ugotavljali smo obseg lunkranja oziroma mikroporoznosti, mikrostrukturo osnove ter obliko in velikost grafitnih nodulov (tabela 2). Velikost napak smo opredelili v dveh razredih:

- A: napake velikosti nad 1.0 mm—predstavljajo lunker, ki zaradi prekinitve mase bistveno vpliva na trdnost ulitka,
- B: napake velikosti pod 0.05 mm; predstavljajo mikroporoznost, ki je pogosto prisotna v omenjenih področjih posameznih delov ulitka. Tej vrsti mikroporoznosti se zaradi značilne morfologije strjevanja



Slika 5. Prerez ulitega preizkušanca (litina 3)¹.

Figure 5. A section of cast sample (Ductile Iron nr. 3)¹.

nodularne litine skoraj ne moremo izogniti, vendar ne poslabšuje trdnostnih lastnosti ulitka, če se pojavlja v omejenem obsegu in v nekritičnih delih.

Ugotovili smo, da lahko dokaj zdrave ulitke pričakujemo iz nelegirane nodularne litine ob hkratnem napajanju in uporabi hladilnih teles ter ulite v trdne forme. To potrjujejo rezultati pregleda ulitkov iz litin serij 5 in 4, v nasprotju

Tabela 2. Rezultati metalografske analize vzorcev¹.

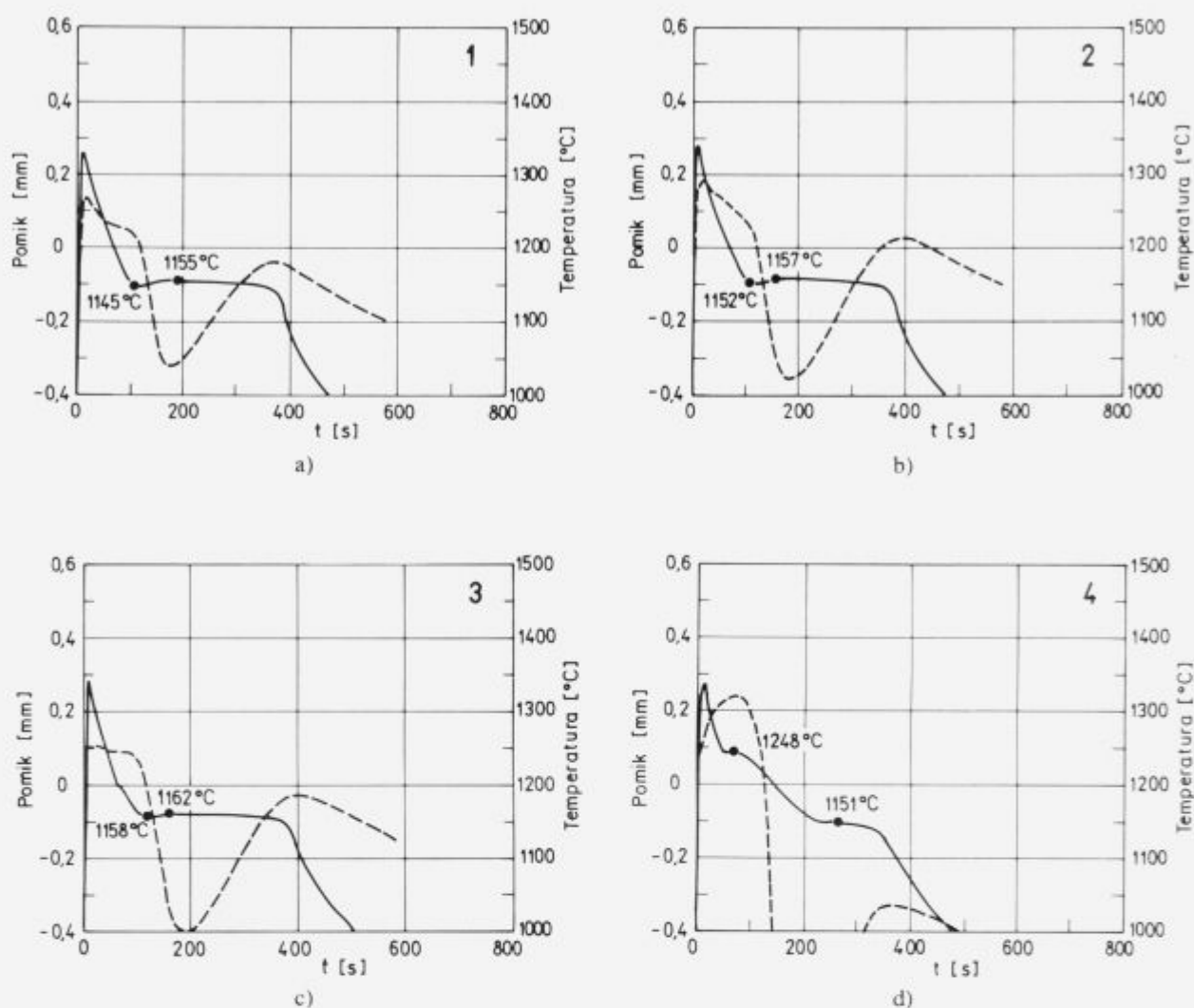
Serija	Mesto	Poroznost		Grafit Oblika	Velikost	Mikrostruktura		Trdota HB
		A	B			Ferit %	Perlit %	
5	1	0	+++	V-VI	5	80	20	158
5	2	0	++	V-VI	4-5	75-80	20-25	156
5	3	0	+	V-VI	5	60	40	150
5S	1	++	+++	V-VI	5	40	60	202
5S	2	++	+++	V-VI	4-5	40	60	187
5S	3	0	+++	VI	5	40	60	184
5SK	1	0	++	VI	5	80	20	156
5SK	2	0	++	V-VI	4-5	80	20	161
5SK	3	0	+	V-VI	5	80	20	174
7	1	++++	++++	V-VI	5-6	90-95	5-10	198
7	2	++++	++++	V-VI	4-5	85	15	211
7	3	+	+++	V-VI	4-5	70	30	211
7S	1	+++	++	VI	5	85-90	10-15	161
7S	2	++	++	VI	5	80-85	15-20	161
7S	3	+++	++	VI	5-6	90-95	10-15	150
7SK	1	0	+	V-VI	4-5	35-40	60-65	255
7SK	2	+	+	V-VI	4-5	30-35	65-70	249
7SK	3	+	+++	V-VI	4-5	30	70	249
4	1	+++	+++	VI	5	75-80	20-25	160
4	2	++	+++	V-VI	5	65-75	25-35	174
4	3	+	+++	V-VI	5	65	35	177
4S	1	+	+++	VI	5	55-60	40-45	174
4S	2	+	+++	V-VI	5	75-80	20-25	177
4S	3	+	+++	V-VI	5	75	25	177
4SK	1	0	+++	V-VI	5-6	85-90	10-15	156
4SK	2	+++	+++	V-VI	5	85-90	10-15	156
4SK	3	+	+	VI	5	85-90	10-15	164

Opomba:

- 0—ni lunke ali mikroporoznosti
- +—majhen lunke ali majhna mikroporoznost
- ++++—zelo velik lunke ali zelo velika mikroporoznost

Tabela 3. Kemijska sestava preiskovanih litin (mas.%)¹.

Litina	C	Si	Mn	Mg	Ni	Mo	Cu	SC
1	3.60	2.50	0.40	0.050	0.50	-	-	1.03
2	3.60	2.50	0.40	0.050	0.50	0.40	0.90	1.03
3	3.60	2.50	0.40	0.050	3.12	0.40	0.90	1.03
4	2.75	1.90	0.75	0.050	3.12	0.40	0.90	0.75



Slika 6. a,b,c,d) Ohlajevalne krivulje ter krivulje krčenja in širjenja litin 1, 2, 3 in 4.¹

Figure 6. a,b,c,d) Cooling and dilatation curves—ductile irons Nrs. 1, 2, 3, 4.

z ulitki iz serije 7, pri katerih smo zasledili največji obseg lunkranja (v področjih 1 in 2) in mikroporoznosti (v področju 3). Na sliki 3 a, b, c so mikroposnetki vzorcev ulitkov iz serije 7, ki so bili uliti brez hkratnega napajanja in uporabe hladilnih teles.

2.5 Ugotavljanje krčenja in širjenja nodularne litine med strjevanjem

Na Avstrijskem inštitutu za livarstvo—OGI v Leobnu so razvili po vsem sodeč dokaj enostavno, a zanesljivo metodo zasledovanja krčenja in širjenja sive litine med strjevanjem. O izvedbi in uporabi je bilo že precej predavanj in objavljenih člankov v strokovni literaturi^{2,3}. Potek meritev je računalniško podprt; zbrane podatke obdelava poseben program s pomočjo katerega se izrišeta ohlajevalna krivulja in krivulja premikov.

Talino od zgoraj ulijemo v cilindrično formo ($D = 60$ mm, $H = 70$ mm), izdelano po postopku CO_2 (sliki 4,

5). Na dveh nasprotnih bočnih straneh forme sta vdelani kvarčni paličici, ki segata 8 mm v livno votlino.

Med strjevanjem taline se premikata skupaj s steno ulitka. Njuni mehanski premiki se prenašajo na merilni celici, kjer pride do pretvorbe mehanskega premika v električni analogni signal. Tega pa s pomočjo A/D pretvornika prevedemo v digitalni signal, primeren za računalniško obdelavo. V toplotnem središču ulitka je nameščen termoelement za merjenje temperature med strjevanjem.

Na opisani napravi smo na OGI, ob sodelovanju dr. Hummerja, izvedli nekaj meritev, od katerih bomo na tem mestu opisali le tiste v zvezi z nodularno litino.

Posamezne taline smo pripravljali v 3 kg indukcijski peči in jih obdelali z nodulatorjem VL 1 ter cepili s FeSi 75. Taljenje kovinskega vložka je trajalo 20 minut in tik pred ulivanjem smo taline v vseh primerih pregreli na $1430^\circ C$.

Kemijska sestava preiskovanih litin je podana v tabeli 3.

Litine 1, 2 in 3 so imele evtektično sestavo, litina 4 pa močno podevtektično sestavo.

Rezultati merjenja krčenja in raztezanja preiskovanih litin so podani v tabeli 4 in na sliki 6 a, b, c, d.

Tabela 4. Krčenje in raztezanje med strjevanjem litin 1, 2, 3, 4.

Litina	Ni (%)	Mo (%)	Cu (%)	Evtektično	
				krčenje (mm)	širjenje (mm)
1	0.5	-	-	-0.382	+0.283
2	0.5	0.4	0.9	-0.422	+0.367
3	3.1	0.4	0.9	-0.456	+0.367
4	3.1	0.4	0.9	-1.311	+0.741

Krčenje litine postaja izrazitejše z večanjem vsebnosti legiranih elementov, kar kaže na povečano neskladnost izločanja evtektičnih faz, austenita in grafitu, pri evtektični kristalizaciji. Po mnenju dr. Hummerja tu ne gre za neposreden vpliv legiranih elementov, pač pa legirani elementi povečajo topnost magnezija v železu in se zaradi tega poveča omenjena neskladnost izločanja evtektičnih faz. To je lahko eden izmed dejavnikov, ki vplivajo na potek strjevanja legirane nodularne litine.

Povečan obseg krčenja pa kaže na povečano nagnjenost litine k lunkranju. Zato je priporočljivo, da v talino vnašamo le tisto najmanjšo potrebno količino magnezija, ki še zagotavlja izoblikovanje kroglastega grafitu. Na ustrezen potek strjevanja pa lahko dodatno vplivamo tudi s cepljenjem.

3 Zaključek

Ugotavljali smo krčenje in širjenje poizkusnih ulitkov iz nodularne litine. Pri nekaj različno legiranih litin smo na OGI v Leobnu določili krčenje in širjenje litine med strjevanjem, kar nam omogoča oceniti nagnjenost posameznih litin k lunkranju. V odvisnosti od tega lahko načrtujemo modelne naprave in predvidimo potreben obseg napajanja.

4 Literatura

- ¹ V. Uršič, M. Tonkovič-Prijanovič, R. Jud: Krčenje in lunkranje nodularne litine—I. del, Poročila MI v Ljubljani 90-076,
- ² R. Hummer: Speisungsbedarf und Längenänderungen während der Erstarrung von Gusseisen mit Kugelgraphit—Folgerungen für die Speiserbemessung, Giesserei—Praxis 1985/ 17–18, 242–254,
- ³ R. Hummer: Beurteilung der Lunkerneigung von Gusseisen mit Kugelgraphit mittels Abkühl- und Längenänderungskurven, Giesserei—Praxis 1989/ 9–10, 142–151,
- ⁴ V. Kondić: Teorija in praksa kontrole poroznosti zaradi krčenja ulitkov, Liv. Vestnik 1984/5, 150–158,
- ⁵ R. Ellerbrock, S. Engler: Kristalizacija nadevtektičnih litin z grafitom, Zbornik predavanj simpozija: Erstarrung metallischer Schmelzen, Aachen 1981, 249–260,
- ⁶ K. Röhrig: Ursachen unzureichender mechanischer Eigenschaften bei zwischenschmelzvergütetem Gusseisen mit Kugelgraphit, Giesserei—Praxis 1988/3–4, 34–38,
- ⁷ W. Schmitz, S. Engler: Ausdehnungsdrücke während der Erstarrung von Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit, Giesserei 90/11, 372–375,
- ⁸ G. Nandori, J. Dul: Untersuchungen über den Abklingeffekt bei Gusseisen mit Kugelgraphit durch Messung der Längen- und Temperaturänderung während der Erstarrung, Giesserei—Praxis 1978/18, 284–290,
- ⁹ B.V. Rabinovitch, A.M. Brodsky: Die Schwindung von Kurbelgehäusen ist nicht gleichförmig, Giesserei 1990/20, 639–641,
- ¹⁰ K. Wagner, H. Pacyna: Studie über die Anwendung des Schwindmasses in Giessereien, Giesserei—Rundschau, 1989/9, 7–16,
- ¹¹ E. Fras, W. Kapturkiewicz: Simuliranje računarom zapreminskih promjena u odlivku u toku njegovog očvršćavanja, Zbornik referatov: Metalurški simpozij, Budva 89, 126–130,