

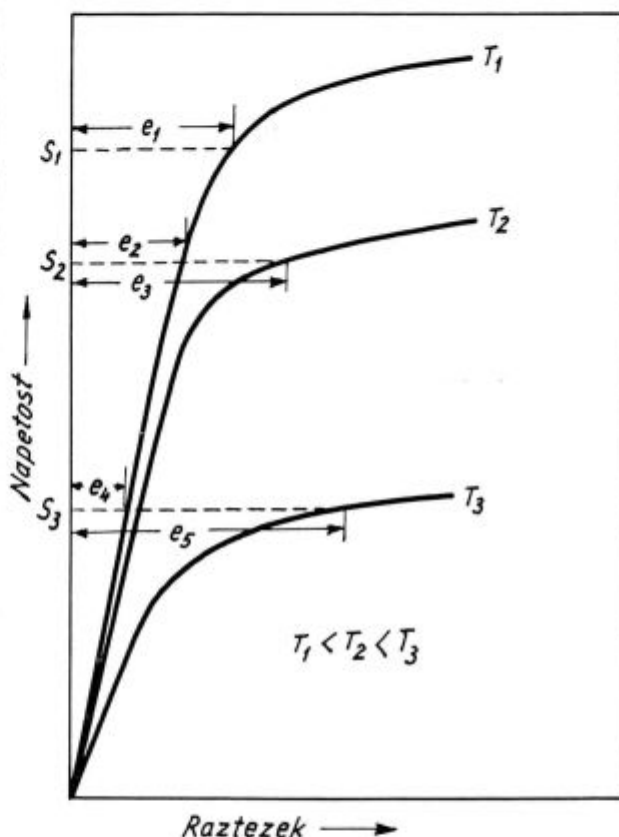
## Vpliv cikličnih termičnih obremenitev na izdržljivost kokilne litine

Iz štirih vrst litine in sicer običajne kokilne litine, litine z nizkim žveplom, modificirane in nodularne litine so bile izdelane probe za preiskavo cikličnih termičnih udarov. Obenem so bile iz istih litin vлите tudi jeklarske kokile. Probe so bile vpete v tog okvir, ki ni dopuščal nobenih deformacij. Togo vpete probe so bile elektrouporovno ogrevane do 850°C in so se nato ohlajevale na zraku. Celotni termični ciklusi so trajali 150 sekund in so se ponavljali vse do zloma probe. Ugotovili smo, da obstoja določena odvisnost med številom termičnih udarov, ki jih je izdržala proba in trajnostjo kokile izdelane iz iste litine.

Temperaturne razlike se razvijajo v kokilni litini pri hitrem segrevanju. Največje temperaturne razlike so pri najvišji temperaturi, katero doseže kokilna litina. Ker ima kokilna litina pri tej temperaturi majhno odpornost proti plastičnim deformacijam so termične napetosti reducirane na minimum. Največje termične napetosti se razvijajo med segrevanjem do maksimalne temperature, takrat, ko je litina še odporna proti plastičnim deformacijam in je sposobna sprejemati napetosti v elastičnem področju. Pri segrevanju jeklarske kokile se na notranji strani pojavijo tlačne napetosti. Njim držijo ravnotežje napetosti na zunanji strani stene kokile, ki so natezne. Med njima je nevtralna črta, v kateri se ne pojavljajo nobene napetosti. V praksi se med litjem v jeklarsko kokilo nevtralna cona spreminja, vendar opisani principi ostanejo nespremenjeni.

Če se trdnost materiala ne spreminja v odvisnosti od temperature, tedaj so krivulje nateznih in tlačnih napetosti v tlačni in natezni coni približno enake. Ravno tako so enake tudi deformacije, ki nastanejo zaradi tlačnih in nateznih napetosti. Če pa nastopajo spremembe v trdnosti materiala, so raztezki v tistem delu stene kokile, ki ima višjo temperaturo in manjšo trdnost veliko večje kot v nasprotnem delu stene kokile, kjer je nizka temperatura in ima material še običajno trdnost. Razlike v raztezkih so tem večje, čim bolj se zniža trdnost litine.

Ti pojavi so shematično prikazani na sliki 1, ki prikazuje krivulje tlačnih odnosno nateznih sil v diagramu napetost-raztezek. Termične napetosti so odvisne od velikosti preprečenega termičnega raztezka, ki se je absorbiral kot mehanska napetost, za katero predpostavljamo, da je velika  $2l_1$ . Če se



Slika 1

Krivulja napetost — raztezek pri različnih temperaturah

ni znižala trdnost zaradi temperature, so tlačne in natezne krivulje napetost-raztezek za notranji in zunanji del stene kokile podane z eno od krivulj na sliki 1 (n.pr.  $T_1$ ). Mehanski raztezek je med tlačnimi in nateznimi napetostmi porazdeljen tako, da je celotna dimenzijska sprememba enaka  $e_1$ , kar bo dalo tlačne in natezne napetosti  $S_1$ . Če je temperatura na notranjem delu stene kokile višja ( $T_2$ ) in ustrezna napetost nekoliko nižja od zunanje ( $T_1$ ), se pojavijo manjše termične napetosti ( $S_2$ ), ki se v ravnotežju s skupnim mehanskim raztezkom

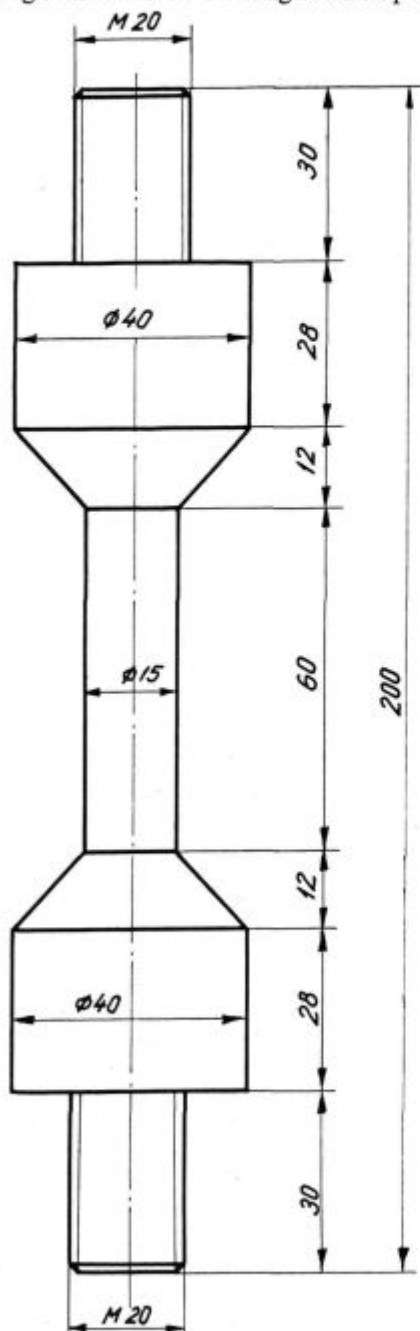
$$2e_1 = e_2 + e_3$$

Tudi iz slike 1 je razvidno, da je napetost pri višjih temperaturah manjša kot pri nižjih. Ugotoviti je mogoče tudi to, da je raztezek pri višji

temperaturi  $T_3$  večji in bolj izrazit istočasno z večjim padcem trdnosti, čeprav je termična napetost ( $S_3$ ) nižja in skupni mehanski raztezek enak

$$2e_1 = e_4 + e_5.$$

Povečanje raztezka na visokotemperaturni strani stene kokile, kjer je padec trdnosti večji, ni odvisno od trdnosti, ki jo ima litina pri običajni temperaturi. Odvisno je samo od padca osnovne trdnosti med visoko in nizko temperaturno stranjo stene kokile. Verjetnost, da bo nastopil zlom se ne zmanjša z nižjimi termičnimi napetostmi pri višji temperaturi. Termična napetost je odvisna od temperaturnega raztezka in od diagrama napetost-raz-



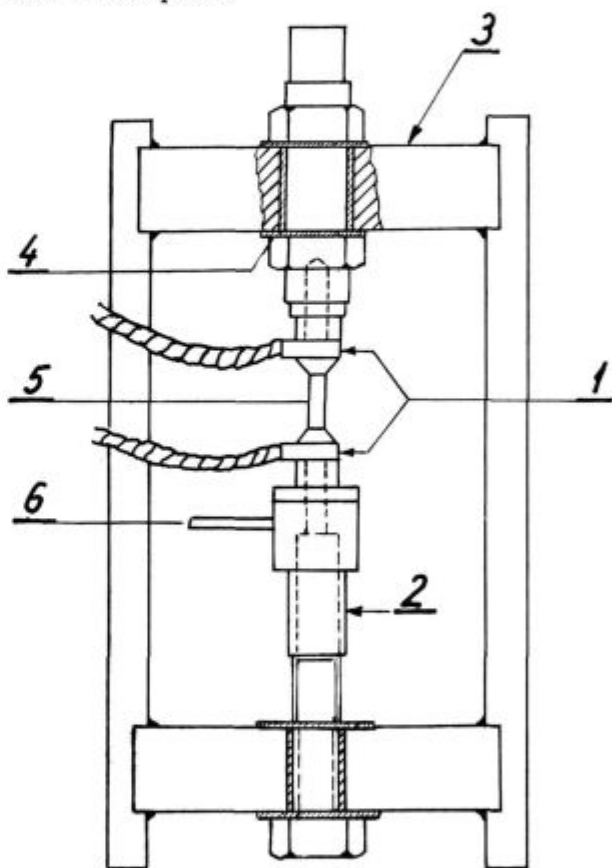
Slika 2  
Izmere probe

tezek, ki je karakterističen za vsak material. Slika 1 prikazuje, da so na notranji visokotemperaturni strani stene kokile mogoče razpoke pri nizkih termičnih napetostih in večjih raztezkih. Termične napetosti so tedaj veliko manjše kot pri običajni temperaturi.

Opisana dogajanja v jeklarski kokili med litjem smo ponovili pri preiskovanju kokilne litine. Pri preiskavah smo uporabili 4 vrste kokilnih litin in sicer:

1. običajno kokilno litino, ki se zaenkrat še najbolj uporablja pri nas.
2. kokilno litino z nizkim žveplom.

Dosedanja preiskovanja s statistično analizo so pokazala, da od glavnih elementov najbolj vpliva na trajnost kokil žveplo. Kokile z nižjim žveplom so pokazale pri statistični analizi tendenco večje trajnosti. Zaradi tega smo uporabljali probe, ki so bile izdelane iz kokilne litine, katera je bila predhodno razžveplana.



- 1- priključki za el. tok
- 2- strain-gage
- 3- jarem
- 4- izolacija
- 5- proba 15 mm premera
- 6- vodno hlajenje

Slika 3  
Okvir za izvajanje termičnih udarov

### 3. modificirana kokilna litina.

Probe so bile izdelane iz kokilne litine, ki je bila predhodno modificirana. Z modificiranjem smo nameravali doseči boljše izoblikovanje in porazdelitev grafita ter ugodnejšo osnovno strukturo.

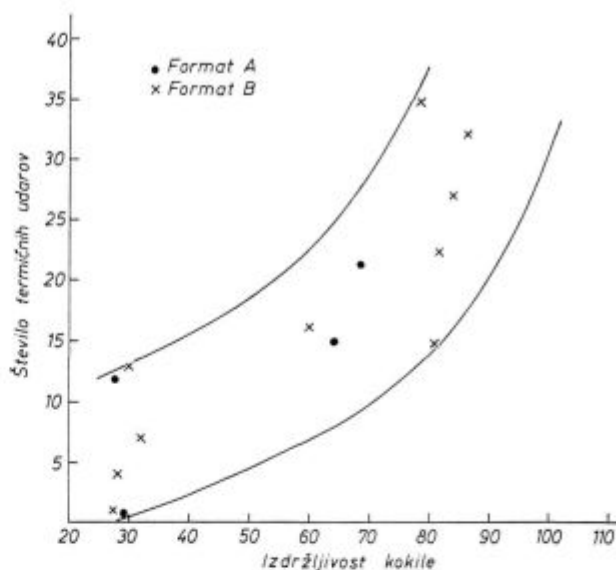
### 4. nodularna litina.

V svetu se vedno bolj uporabljajo kokile, ki so izdelane iz nodularne litine. Dosedanje izkušnje so pokazale, da so kokile, ki so izdelane iz nodularne litine, pokazale znatno večjo trajnost.

Iz navedenih vrst kokilnih litin smo izdelali preizkusne probe z izmerami, ki so prikazane na sliki 2. Obenem so bile ulite iz istega materiala tudi jeklarske kokile, ki so se nato uporabljale v jeklarnah. Pri uporabi se je opazovala njihova trajnost in vzroki izločanja.

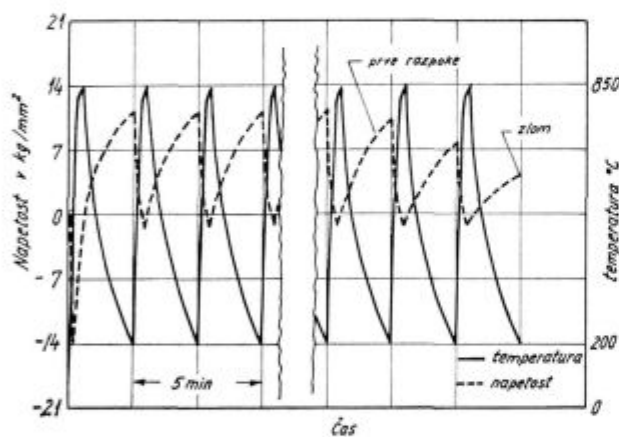
Probe smo preiskovali s posebno metodo. Vpeli smo jih v okvir, ki ni dopuščal niti raztezkov niti skrčkov (slika 3). Probo, ki je bila tako povsem togo vpeta, smo ciklično ogrevali s pomočjo električno upornega gretja. Za ogrevanje smo uporabili transformator z močjo 40 KW, kateri je dajal električni tok z jakostjo približno 2000 A in napetostjo nekaj V. Dogajanja v probi med izvajanjem posameznih ciklov so razvidna iz slike 4, ki shematično prikazuje napetosti pri spremembah tempe-

ba ohlajevati, litina se je krčila, kar je imelo za posledico, da so se v probi pojavile natezne napetosti. Proba se pri ohlajevanju ni več ohladila do normalne temperature, temveč približno na 200° C.



Slika 5

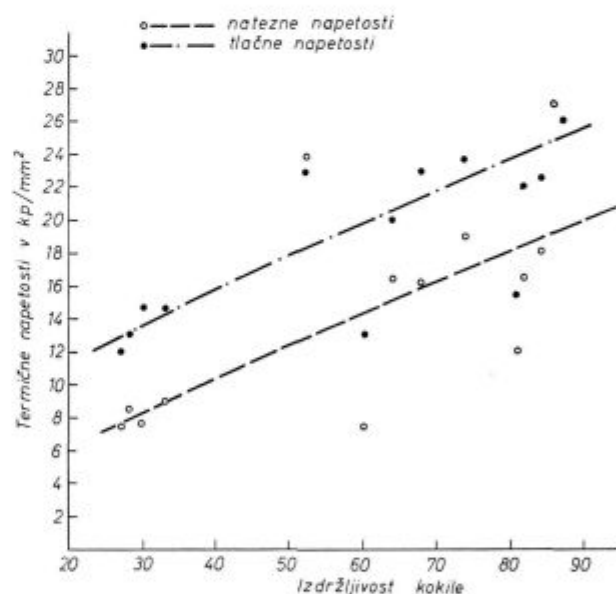
Stevilo termičnih udarov v odvisnosti od vzdržnosti kokil



Slika 4

Shematični prikaz napetosti in temperature v probi

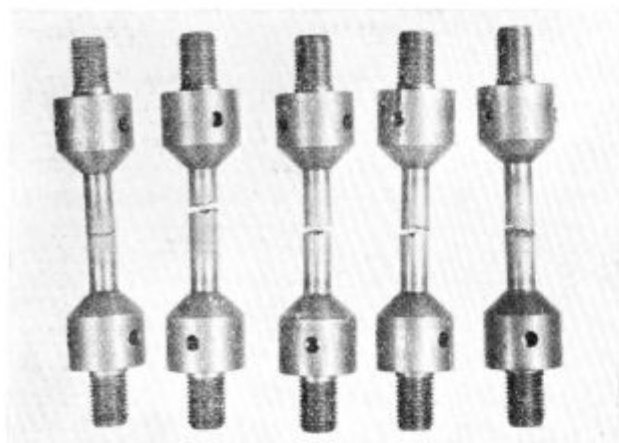
rature v probi. Z električnim tokom smo probo ogreli v približno 20–25 sekundah na temperaturo 850° C. Ko je proba dosegla to temperaturo, smo tok izklopili in proba se je ohlajala 125–130 sekund. Celotni cikel je trajal 150 sekund. Pri tem so se v probi pojavljale natezne in tlačne obremenitve. Pri prvem ciklusu, ko se je togo vpeta proba ogrevala od običajne temperature na temperaturo 850° C so se v probi pojavljale velike tlačne napetosti. Tlačne napetosti so dosegle maksimalno vrednost med samim ogrevanjem. Ko se je temperatura približevala 850° C, litina ni bila več sposobna sprejemati napetosti v elastičnem območju in se je plastično deformirala. Pri maksimalni temperaturi so znašale tlačne napetosti samo še nekaj kg/mm². Po končanem ogrevanju se je pričela pro-



Slika 6

Velikost termičnih napetosti v odvisnosti od vzdržnosti kokil

Cikluse smo ponavljali do zloma probe. Celotni cikel je potekal povsem avtomatično. Temperaturo smo merili s pomočjo elektronskega optičnega pirometra, ki je avtomatsko izklopil električni tok, ko je bila dosežena temperatura. Časovni potek je bil reguliran s pomočjo časovnih relejev. Da bi lahko merili napetost v probi, smo vključili obenem s probo v okvir tudi merilno celico, s pomočjo katere smo ugotavljali napetosti v preiskovani



Slika 7  
Probe po zlomu

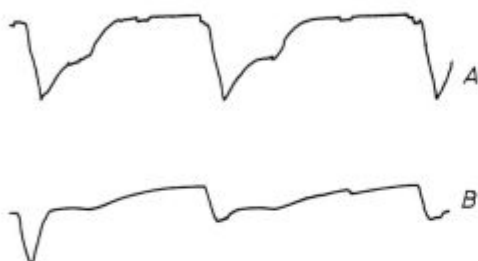


Diagram običajne kokilne litine : A-temperatura  
B-napetosti

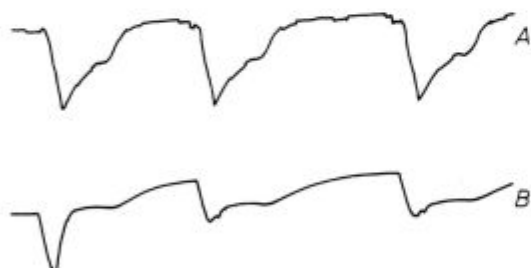


Diagram litine z nizkim S : A-temperatura  
B-napetosti

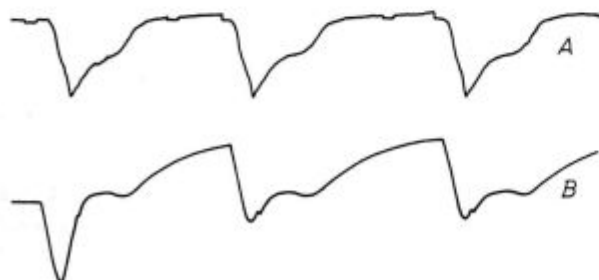


Diagram modificirane litine : A-temperatura  
B-napetosti

Slika 8

Diagram dejanskega poteka napetosti in temperature v probi

probi. Merjenje napetosti je bilo s pomočjo tenzometrov. Napetosti in temperaturo smo registrirali na registrirni trak.

Rezultate, katere smo dosegli z opisano probo, so podani v tabeli in na sliki 5. V naslednji tabeli so podane termične napetosti, ki so se pojavile v probi med temperaturnimi cikli. Slika 6 pa prikazuje kakšna odvisnost obstoja med velikostjo termičnih napetosti in vzdržnostjo kokile. Slika 7

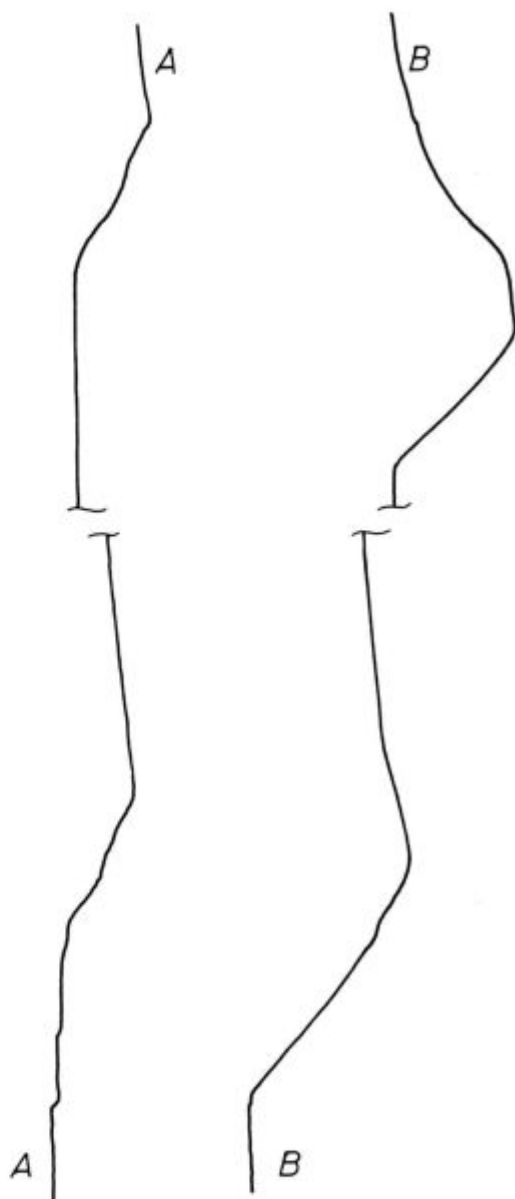


Diagram nodularne litine:

A — temperatura  
B — napetosti

Slika 9

Diagram dejanskega poteka napetosti in temperature v probi

nam kaže probe po zlomu. Na slikah 8 in 9 so prikazane krivulje dejanskega poteka napetosti in temperature v probah.

#### Vzdržnost prob in vzdržnost kokil

| Ste-<br>vilka<br>probe | Vrsta litine        | Število<br>termičnih<br>udarov | Izdrž-<br>ljivost<br>kokile |
|------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| <b>Format A</b>        |                     |                                |                             |
| 38                     | litina z nizkim S   | 12                             | 27                          |
| 44                     | litina z nizkim S   | 1                              | 29                          |
| 1                      | modificirana litina | 23                             | 68                          |
| 19                     | modificirana litina | 15                             | 64                          |
| 3                      | nodularna litina    | 200                            | 52                          |
| <b>Format B</b>        |                     |                                |                             |
| 25                     | hematitna litina    | 15                             | 81                          |
| 27                     | hematitna litina    | 13                             | 30                          |
| 18                     | litina z nizkim S   | 32                             | 86                          |
| 30                     | litina z nizkim S   | 4                              | 28                          |
| 37                     | litina z nizkim S   | 16                             | 60                          |
| 41                     | litina z nizkim S   | 1                              | 26                          |
| 46                     | litina z nizkim S   | 7                              | 33                          |
| 9                      | modificirana litina | 23                             | 82                          |
| 11                     | modificirana litina | 35                             | 74                          |
| 13                     | modificirana litina | 27                             | 84                          |

Format A = OK 350

Format B = OKGV 255

#### Zaključek

Med številom termičnih udarov, ki jih je vzdržala proba in med izdržljivostjo ustrezne kokile obstoja neka odvisnost. Upoštevati pa moramo, da so bile probe podvržene predvsem obremenitvam zaradi termičnih napetosti, medtem ko so jeklarske kokile izločene ne samo zaradi razpok, temveč tudi zaradi zajed. Ravno tako obstoja določena odvisnost med velikostjo termičnih napetosti in iz-

#### Velikost termičnih napetosti v probah

| St.<br>probe    | Termične napetosti (max.)    |                               |
|-----------------|------------------------------|-------------------------------|
|                 | tlačne<br>kp/mm <sup>2</sup> | natezne<br>kp/mm <sup>2</sup> |
| <b>Format A</b> |                              |                               |
|                 | 1. cikel                     | 2. cikel                      |
| 38              | 12,0                         | 2,5                           |
| 44              | —                            | —                             |
| 1               | 23,7                         | 4,1                           |
| 19              | 20,1                         | 3,5                           |
| 3               | 23,8                         | 3,5                           |
| <b>Format B</b> |                              |                               |
|                 | 1. cikel                     | 2. cikel                      |
| 25              | 15,4                         | 2,4                           |
| 27              | 114,3                        | 2,4                           |
| 18              | 26,0                         | 4,7                           |
| 30              | 13,0                         | 2,4                           |
| 37              | 13,0                         | 2,4                           |
| 46              | 14,2                         | 2,4                           |
| 9               | 22,0                         | 4,2                           |
| 11              | 23,8                         | 4,7                           |
| 13              | 22,5                         | 6,0                           |

Iz diagramov je razvidno, da nastopajo tako pri ogrevanju kakor tudi pri ohlajevanju določene anomalije odnosno zakasnitve, je povezano s strukturnimi spremembami v materialu.

držnostjo kokile. Čim večje so notranje termične napetosti, tem bolj kvalitetna je litina in tem večja je tudi njena trajnost. Običajna kokilna litina in litina z nizkim žveplom sta imeli nižje termične napetosti kot modificirana in nodularna litina.

Opisane preiskave še niso dokončane. Nadaljnje delo bo pokazalo ali je mogoče dobiti točnejšo odvisnost med številom termičnih udarov, ki jih je izdržala neka litina in trajnostjo jeklarske kokile.

#### Literatura

1. H. Bühler in W. Schepp: »Beitrag zur Frage der Eigenspannungen in Gusseisen«. Giesserei TWB 1959 H. 25 str. 1395—1401.
2. W. Grundig: »Über den Elastizitätsmodul  $E_0$  der graphithaltigen Eisenwerkstoffe«, Giesserei TWB 1956 H. 16 str. 809—814.

3. E. Houdremont in H. Scholl: »Die Bewertung innerer Spannungen für die Praxis«. Metallkunde, 1959, zv. 9, str. 503—511.
4. H. Schlechtweg: »Spannungsmessungen an Gusseisen nach dem modifizierten Invarianten Verfahren«. Giesserei TWB, 1955, zv. 15, str. 801—803.
5. J. R. Kattus: »Study of Mold-Iron Compositions«, Blast Furnace and Steel Plant, Febr. 1961, str. 159—163.

#### ZUSAMMENFASSUNG

In der Praxis ist es gewöhnlich schwer zu beweisen, dass ein zu früheres Ausfallen der Kokille durch die zu schlechte Beständigkeit des Kokillengusseisens verursacht wird. Deswegen haben wir eine Methode überprüft, welche für die Bestimmung der Beständigkeit des Kokillengusses bei wiederholten thermischen Beanspruchungen dienen

sollte und nach welcher eine Schätzung der Kokillenbeständigkeit möglich wäre.

Die Probe haben wir in ein Joch eingespannt, welches keine Zusammenschrumpfungen und Ausdehnungen erlaubte. Die Probe haben wir elektrisch auf eine Temperatur von 850°C erwärmt. Bei dieser Erwärmung welche 20 bis 30

Секунды длились, возникли напряжения и при охлаждении растяжения. Эти нагревания повторялись до момента разрыва.

Мы исследовали по этому способу четыре сорта чугуна: обыкновенный кокильный, белый, модифицированный и белый с графитом.

Пробы зависели от структуры чугуна: различные количества циклов выдержки. Некоторые пробы с полностью белым чугуном (белый с низким содержанием серы) выдержали только несколько циклов. Немного лучше выдержали пробы из модифицированного чугуна. Пробы из белого чугуна выдержали 20—45 циклов. Пробы из белого с графитом выдержали без разрыва до 200 циклов.

## SUMMARY

In practice it is difficult to prove that a too low lifetime of a mold has origin in mold casting. Therefore a method was tested at the Metallurgical Institute in Ljubljana which enables us to test endurance of mold castings under repeated thermal stresses in order to forecast lifetimes of molds.

A specimen is fixed in a rigid frame which does not allow expansions or contractions. Specimens were electrically heated to 850° C. When heated up for 20 to 30 secs, compressive stresses appear in the specimen and during cooling off time tensile stresses are present. The heating-up periods were repeated until the break down of the specimen.

Four sorts of castings were tested by this method: an ordinary mold casting

a casting with low sulphur  
a modified casting, and  
a nodular casting.

Depending upon the microstructure of castings, specimens were able to stay various numbers of heating and cooling off cycles. Some specimen with a completely white microstructure (castings with low sulphur) were able to stay only few cycles. Somewhat better endurance was shown by specimens of ordinary mold casting (up to 10 cycles).

Modified castings stayed 20 to 45 cycles, and specimens of nodular castings were able to stay even 200 cycles before the break down.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В практике обыкновенно трудно доказать, что причина плохой стойкости изложниц плохая стойкость кокильного литейного металла. Поэтому на металлургическом заводе в Любляне (Югославия) испытан метод по которому было бы возможно определять стойкость кокильного литейного металла на основании чередующихся термических нагрузок и наперед дать оценку о стойкости изложниц.

В ядро, которое не допускало усадок и растяжений, прикрепленная проба была путем электрического сопротивления подвержена нагреву на темп. от 850° Ц. При этом нагреве, которое длилось всего 20—30 сек. возникали сжимающие напряжения а при

охлаждении силы растяжения. Нагрев повторяли до излома пробы.

Таким образом испытаны четыре сорта литейного металла, и то: обыкновенный кокильный металл, металл с низким содержанием серы, модифицированный металл и металл с шаровидным графитом. В отношении структуры, пробы выдержали различное число циклов. Некоторые пробы, на переломе белой структуры, выдержали всего несколько циклов. Немного лучше стойкость до 10 циклов выдержали пробы из кокильного литейного металла. Пробы из модифицированного литейного металла выдержали 20—45 циклов, а пробы с шаровидным графитом выдержали без излома до 200 циклов.