TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Disertační práce

2003

Ing. Petr Vodička

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA STOJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Vliv podmínek grafitizace litin na vznik ředin a staženin v odlitcích

Disertační práce

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI
3146073549

Autor : Ing. Petr Vodička

Školitel : Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.

Vedoucí katedry : Doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Liberec, červen 2003

KSp
U 389 S +1x TEZE 162 s., 20 s. příl. nu. tab.

Počet stran celkem	:	182
Počet stran textu	:	161
Počet stran příloh	:	21
Počet obrázků	:	180
Počet tabulek	:	24

Keywords – Klíčová slova

Casting (test, serial)	- odlitek (zkušební, sériový)
cast iron with lamell, vermicular, spheroid graphite,	- litina s lamelárním, červíkovým, globulárním grafitem
mechanical properties	- mechanické vlastnosti
technological parameters	- technologické parametry
construction parameters	- konstrukční parametry
form temperature	- teplota formy
sand bentonite form	- písková bentonitová forma
thermo bundle	- tepelný uzel
extension	- nálitek
hiddn defekt	- skryté vady
srincagporositi	- ředina
contraction	- staženina
smelter electric, gas, kupola	- tavící pec elektrická,plynová,kuplovna
melting temperature	- teplota taveniny
inoculation	- očkování
form filling	- plnění formy
hardening of melt	- tuhnutí taveniny
test specimen	- zkušební těleso
termo analysis	- termická analýza
dilatation	- dilatace

Překlad názvu disertační práce do angličtiny :

Impact condition graphitization of cast iron on origin hiddn defekts Srincagporositi and contraction in castings.

Seznam publikací doktoranda :

1. SKRBEK B., VODIČKA P. : Zkušenosti s provozováním ultrazvukové rychlozkoušky účinku modifikátoru. Konference : „Očkovadla a předslitiny", sborník, INPEKO Žilina, 1991, str. 112 –118.

2. EXNER, J., JELÍNEK, M., VODIČKA, P., KONEČNÝ, L., VRBA, M., HOŠEK, Z.: Hodnocení metalurgické jakosti litiny s kuličkovým grafitem. 15.celostátní konference "Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem" . Svratka 26. Až 28. 11. 2001. s. 178-185. ISBN 80-02-01464-2

3. VODIČKA, P., HOŠEK, Z.: Setkání komise 7.1 a 7.4 CIATF, TU Liberec KST 28-29.5.2002

4. HOŠEK J., VODIČKA P. ,STARÁ M. :Metalografický rozbor archeologického nálezu z lokality Příšovice, okres Liberec. In :vědecká pojednání III-1 –Sborník střediska pro koordinaci výzkumu na vysokých školách v Euroregionu Nisa, Liberec, 1997, str. 31-5, ISBN 80-7083-256-8.

5. HOŠEK J., DOBRKOVSKÝ P., VODIČKA P., PROSTŘEDNÍK, J.: Metalografický rozbor archeologického nálezu tří středověkých užitných předmětů a hrotu kopí. In: Vědecká pojednání IV-1 - Sborník střediska pro koordinaci výzkumu na vysokých školách v Euroregionu Nisa, Liberec, 1998, str. 18-24, ISBN 80-7083-294-0.

6. HOŠEK J., Vodička P.: Rozbor železných předmětů z výzkumu sklářské hutě v Bedřichově. In : Sborník - Archeologie Libereckého kraje II., Severočeské muzeum v Liberci. (Odevzdáno do tisku)

ŽIVOTOPIS V DATECH

Osobní data

Jméno : Ing. Petr Vodička
Narození : 2.6. 1964 v Liberci
Stav : ženatý, dvě děti

Studium

Základní škola : 1970 – 1979 ZDŠ v Rochlicích v Liberci
Střední škola : 1979 – 1983 SOUS LIAZ Jablonec n. N.
Studium ukončeno výučním listem a maturitou
Vysoká škola : 1983 – 1987 TU Liberec, FS, Katedra strojírenské metalurgie
Postgraduální studium : 1989 – 1991 VUT Brno, FS, Katedra slévárenství
Použití výpočetní techniky ve slévárenství
Doktorandské studium : 1994 – 2003 TU Liberec, FS, KSM
Vliv grafitizace litin na vznik staženin a ředin v odlitcích
Jazykové kurzy : Němčina 1990 – 2003
Angličtina 1995 – 2002
Školení : Interní auditor ISO 9000, 1998
Dale Carnegie kurz, Praha 2001 – 2002
FNK 2003 – Týmová spolupráce
Komunikace I
Hodnotící systém For Business Excellence

Zaměstnání a odborné práce

Slévárna Liberec a.s. 1987 – oddělení metalurgie
1993 – vedoucí oddělení metalurgie
1998 – 2000 vedoucí TPV
ŠKODA AUTO a.s. 2000 – vedoucí oddělení technologie AL
2001 – 2003 vedoucí sériového plánování VAH/3

Člen Slévárenské společnosti 1987 – 2003, Odborná komise tavení litin 1993 – 2001
Výuka na TU Liberec 1996/97, předmět Nauka o materiálu I.
Vedení bakalářských a inženýrských odborných prací, oponentní posudky 1993 – 2002

Mimopracovní činnost

Práce s mládeží : člen Turistických oddílů Lokomotiva, Dynamo Liberec 1980 – 1989
Vůdce skautského oddílu 1990 – 2000
Člen vedení skautského střediska Ještěd 2000 – 2003

V Liberci 21. 6. 2003

Ing. Petr Vodička
Moravská 119
Liberec XX
460 10

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek 3
1. Úvod 5
2. Literární průzkum 6
2.1 Charakteristika slévárenských vad homogenity odlitků – staženiny 6
2.2 Vznik vad homogenity v litinových odlitcích litých do pískových forem 7
2.2.1 Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem, LLG 7
2.2.2 Krystalizace litiny s kuličkovým grafitem, LKG 15
2.2.3 Krystalizace litiny s červíkovitým grafitem, LČG 16
2.2.4 Ovlivňování krystalizace litin očkováním 16
2.3 Rozbor tuhnutí litin ve slévárenské pískové formě 22
2.3.1 Tepelné pochody v soustavě kov forma 22
2.3.2 Přestup tepla z taveniny do formy 23
2.3.3 Průběh tuhnutí a chladnutí kovu ve slévárenské formě 26
2.4 Kinetika tuhnutí a její vliv na homogenitu odlitků 27
2.4.1 Smršťování slitin do ztuhnutí odlitku 27
2.4.1.1 Smršťování slitin v tekutém stavu 27
2.4.1.2 Smršťování slitin v intervalu tuhnutí 28
2.4.1.3 Smršťování slitin v tuhém stavu v intervalu tuhnutí 32
2.4.2 Fyzikální a fyzikálně-chemické vlivy na průběh smršťování litin 33
2.4.2.1 Vliv chemického složení taveniny 33
2.4.2.2 Vliv struktury 40
2.4.2.3 Vliv úpravy tekuté litiny 41
2.4.2.4 Vliv ochlazovacího účinku formy 44
2.4.2.5 Vliv tuhnutí tekuté litiny 44
2.4.2.6 Vliv tavícího agregátu a tavícího režimu 46
2.4.2.7 Vliv složení vsázky 46
2.4.2.8 Vliv teploty přehřátí tekuté litiny 46
2.4.2.9 Vliv licí teploty 46
2.4.2.10 Vliv doby odlévání 47
2.4.3 Vliv formovacího materiálu 48
2.4.3.1 Vliv základních vlastností pískových forem 48
2.4.3.2 Vliv parametrů formy na lineární změny odlitku 48
2.4.3.3 Vliv tuhosti formy a pojivového systému 50
2.4.3.4 Vliv druhu ostřiva 53
2.4.3.5 Statistické vyhodnocení vlivu formy na homogenitu odlitků 54
2.5 Vliv technologických parametrů na vznik vady 55
2.5.1 Vliv konstrukce odlitku (technologie výroby odlitků) 55
2.5.2 Nálitkování a chladítka 55
2.5.3 Vtokové soustavy 56
2.6 Používané zkoušky a jejich vyhodnocení 56
2.6.1 Simulace tuhnutí odlitku 56
2.6.2 Zkušební odlitky 56
2.6.3 Metody vyhodnocení naměřených výsledků 58
2.6.3.1 Vyhodnocení teplotních a dilatačních křivek 58
2.6.3.2 Vyhodnocení homogenity zkušebních vzorků a odlitků 61
3. Experimentální část 62
3.1 Metodika experimentální práce 62

3.2 Popis zkušebních a sériových odlitků, měřící aparatury a jejího zapojení ... 62
3.2.1 Zkušební odlitek – válcová tyč ... 62
3.2.2 Zkušební odlitek – válcový špalek ... 64
3.2.3 Popis sériových odlitků ... 67
3.2.4 Použité formovací materiály ... 71
3.2.5 Použité tavící agregáty ... 73
3.2.6 Použitá kvalita litin a její sekundární zpracování ... 74
3.2.7 Popis provedených měření ... 75
3.3 Zpracování dosažených výsledků ... 76
3.3.1 Metalografické vyhodnocení zkušebních vzorků a sériových odlitků ... 76
3.3.1.1 Makropozorování metalografických vzorků ... 78
3.3.1.2 Mikropozorování metalografických vzorků ... 78
3.3.2 Hodnocení grafitu pomocí ultrazvukového tloušťkoměru ... 79
3.3.3 Hodnocení homogenity vzorků a sériových odlitků ... 80
3.3.3.1 Hodnocení pomocí RTG defektoskopie ... 80
3.3.3.2 Hodnocení odlitků na řezech pomocí optické mikroskopie ... 81
3.3.4 Hodnocení zákalkové zkoušky ... 85
3.3.5 Vyhodnocení dosažených teplotních a dilatačních charakteristik ... 86
3.3.6 Měření množství aktivního kyslíku v tavenině litin ... 89
4. Rozbor dosažených výsledků ... 90
4.1 Rozbor vlivů na charakter a průběh dilatačních dějů během tuhnutí litin ... 90
4.1.1 Rozbor výsledků D a T křivek ze zkoušek s válcovou tyčí (VT) ... 90
4.1.1.1 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek VT s LLG ... 91
4.1.1.2 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek VT s LKG ... 99
4.1.2 Rozbor výsledků D a T křivek ze zkoušek s válcovým špalkem (VŠ) ... 104
4.1.2.1 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek VŠ s LLG ... 104
4.1.2.2 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek VŠ s LKG, LKG ... 117
4.1.2.3 Porovnání měření na válcovém špalku s kvalitou sériových odlitků ... 128
4.1.3 Rozbor vlivu konstrukce zkušebního odlitku na dilatační křivky ... 142
4.1.4 Rozbor vlivu formy na průběh dilatačních křivek ... 144
4.1.5 Rozbor vlivu kovové formy na průběhy D křivek u zkoušek VŠ ... 144
4.1.6 Rozbor vlivu grafitické expanze L2max-L1min na max. expanzi L2max ... 146
4.2 Diskuse ... 149
4.2.1 Vliv vsázky a tavícího agregátu ... 149
4.2.2 Vliv chemického složení ... 149
4.2.3 Vliv licí teploty ... 149
4.2.4 Vliv sekundárního zpracování taveniny ... 149
4.2.5 Vyhodnocení souvislosti množství aktivního kyslíku v tavenině s maximální a eutektickou dilatací během tuhnutí grafitických litin ... 152
5. Závěr ... 154
Vlastní přínos předložené práce ... 155
Použitá literatura ... 156
Resumé ... 160
Přílohy ... 162

Seznam použitých symbolů a zkratek

α	-součinitel přestupu tepla	[J. $m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$]
α_{VL}	-součinitel objemového smrštění v tekutém stavu	[$°C^{-1}$]
α_{VS}	-součinitel objemového smrštění v tuhém stavu	[$°C^{-1}$]
β	-součinitel přestupu tepla v mezeře mezi odlitkem a formou	[J. $m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$]
ε_L	-délkové smrštění	[%]
ε_V	-objemové smrštění	[%]
ε_{VS}	-objemové smrštění v tuhém stavu	[%]
ε_{VL}	-objemové smrštění v tekutém stavu	[%]
$\lambda_{(f, m)}$	-součinitel tepelné vodivosti (formy, mezery)	[J . m^{-2} .$s^{-1}.K^{-1}$]
ρ	-měrná hmotnost	[kg.m^{-3}]
τ	- čas	[s]
∇	-Laplaceův operátor	
$a_{(f)}$	-součinitel teplotní vodivosti (formy)	[m^2s^{-1}]
a_c	-aktivita uhlíku	
a_o	-množství aktivního kyslíku v tavenině	[ppm]
b_f	-součinitel teplotní akumulace formy	[W . $s^{1/2}$ .m^{-2}. K^{-1}]
Bi	-kritérium intenzity výměny tepla mezi odlitkem a okolním prostředím	
c	-měrná tepelná kapacita	[J.$kg^{-1}.K^{-1}$]
CE	- uhlíkový ekvivalent	[%]
c_f	-měrná tepelná kapacita materiálu formy	[J.$kg^{-1}.K^{-1}$]
D_1	-hodnota dilatace při teplotě likvidu	
D_2	-první maximum na dilatační křivce	
D_3	-inflexní bod klesající křivky z prvního maxima	
D_4	-první minimum na dilatační křivce	
D_5	-inflexní bod stoupající křivky před druhým maximem	
D_6	-druhé maximum na dilatační křivce	
D_7	- inflexní bod klesající křivky z druhého maxima	
dQ	-množství přestupujícího tepla z odlitku do formy	[J]
F	-plocha styku kovu s povrchem formy	[m^2]
F_0	-Fourierovo kritérium	
G	-Gibbsova energie	[J]
K	-kritérium intenzity výměny tepla mezi odlitkem a formou přes mezeru	
L	-množství tepla vzniklého nebo pohlceného za jednotku času v jednotce objemu	[J. s^{-1}. m^{-3}]
L_{1max}	-hodnota prvního maxima dilatační křivky	[mm]
L_{1min}	-hodnota minima dilatační křivky	[mm]
L_{2max}	-hodnota druhého max. dilatační křivky, celková max. dilatace	[mm]
L_{2max} - L_{1min}	-hodnota grafitické expanze, dilatace	[mm]
l	- tloušťka vzorku	[mm]
l_U	- tloušťka vzorku změřená ultrazvukovým tloušťkoměrem	[mm]
M_o	-modul odlitku	[m]
n_2	-stupeň paraboly	
q(V)	-změna objemu	
RU	-hodnota relativního podchlazení	
R	-koeficient korelace	
R^2	-hodnota spolehlivosti proložené korelační křivky	
Sc	-stupeň eutektičnosti	
S_o	-povrch odlitku	[m^2]

Sexp	-nárůst objemu expandující fáze	[%]
t_1	-čas primární krystalizace	[s]
t_{1max}	-čas prvního maxima dilatační křivky	[s]
t_{1min}	-čas minima dilatační křivky	[s]
t_{2max}	-čas druhého maxima dilatační křivky	[s]
t_E	-čas eutektické přeměny	[s]
t_{ed}	-čas eutektoidní přeměny	[s]
t_f	-čas krystalizace fosfidového eutektika	[s]
$t_L, t_{S0}, t_{S1}, t_{S2}$	-časy bodů $T_L, T_{S0}, T_{S1}, T_{S2}$	[s]
$t_{D1} - t_{D7}$	-časy bodů $D_1 - D_7$	[s]
tg β	-sklon křivky tuhnutí eutektika	[°]
tg α	-rychlost stoupání D křivek v oblasti grafitické expanze	[m.s^{-1}]
T	-teplota	[°C, K]
T_0	-počáteční teplota formy před odléváním	[°C]
T_{2max}	-teplota při druhém maximu dilatační křivky	[°C]
T_{ed}	-teplota eutektoidní přeměny	[°C]
T_E	-teplota eutektické přeměny	[°C]
T_{EM}	-teplota metastabilního eutektika	[°C]
T_{ES}	-teplota stabilního eutektika	[°C]
T_{EI}, dT_E	-hodnoty eutektického podchlazení	[°C]
T_f	-teplota počátku krystalizace fosfidového eutektika	[°C]
T_F	-teplota formy	[°C]
T_L	-teplota počátku primární krystalizace, teplota likvidu	[°C]
T_P	-teplota vnitřního povrchu formy	[°C]
T_{S0}	-počáteční teplota eutektické reakce na teplotní křivce	[°C]
T_{S1}	-teplota pravděpodobného ukončení eutektické reakce	[°C]
T_{S2}	-teplota pravděpodobného ukončení tuhnutí taveniny	[°C]
T_t	-teplota taveniny při odlévání	[°C]
T_x	-teplota formy v bodě ve vzdálenosti x od povrchu	[°C]
V_{st}	-naměřený objem staženin	[%]
V_o	-objem odlitku	[m^3]
$v_{r\,(so)}$	-relativní rychlost zvuku (sériové odlitky)	
v_x, v_y, v_z	– rychlost přesunu elementu ve směrech os x, y, z.	
x	-tloušťka stěny formy	[m]
x_b	-vzdálenost sledovaného místa od vnitřního povrchu formy	[m]
x_m	-šířka spáry (mezery) mezi odlitkem a formou	[m]
x_2	-tloušťka prohřáté vrstvy formy	[m]

CT směs - formovací směs pojená vodním sklem, tvrzená CO_2
D křivky - dilatační křivky
EB - eutektické buňky
EMN - elektromotorické napětí
EGM - množství uhlíku vyloučeného ve formě grafitu
JBFS - jednotná bentonitová formovací směs
KVZ - kovy vzácných zemin
LČG - litina s červíkovým grafitem
LKG - litina s kuličkovým grafitem
LLG - litina s lupínkovým grafitem
PC - osobní počítač
T křivky - teplotní křivky
VŠ - zkušební odlitek tvaru válcového špalku
VT - zkušební odlitek tvaru válcové tyče

1. Úvod

Na základě zvyšujících se požadavků na hodnoty užitných mechanických vlastností u litinových dílů, při zachování stávající či nižší úrovně nákladů na jejich výrobu a zpracování , přetrvává potřeba zabývat se i nadále řešením problematiky předcházení vzniku skrytých slévárenských vad - vnitřní homogenity odlitků z litin s lamelárním, červíkovitým a kuličkovým grafitem.
Vedle oceláren a sléváren odlitků z litiny s kuličkovým grafitem , které mají s touto problematikou bohaté zkušenosti , je třeba věnovat stejnou pozornost těmto vadám u odlitků ze šedé litiny a při jejich zkoumání využít nejmodernějších dostupných metod. S těmito vadami se setkáváme nejen tam , kde sama konstrukce předurčila vznik tepelného uzlu (např. křížením stěn či vlivem technologických nálitků), ale i u sortimentů konstrukčně jednoduchých rotačních o hmotnosti již od 10kg s tloušťkou stěny cca 15 mm , jako například u brzdových kotoučů či brzdových bubnů (při hmotnosti cca 70kg a tloušťky stěn cca 20 mm).
Teorií vzniku ředin a staženin se již téměř půl století systematicky zabývá řada našich i zahraničních slévárenských odborníků. Můžeme tedy konstatovat, že základní principy odstranění negativních vlivů vzniku těchto vad jsou dostatečně známy. Jeden z technologických důvodů a přetrvávajících problémů je zejména nízká univerzálnost současně používaných technologických celků : výkonných automatických formovacích linek , které jsou používány pro své nízké výrobní náklady u sériové a hromadné výroby a to i u uvedených problémových typů odlitků.

Z těchto důvodů nelze zcela úspěšně využít například kovových chladítek či operativní změny formovacích materiálů k ovlivnění posunutí tepelné osy při tuhnutí taveniny ve stěně odlitku do míst, kde nebude mít ředina či staženina významný vliv na funkčnost odlitku. Nelze také zásadně měnit chemické složení šedé litiny z důvodů předepsaných mechanických vlastností požadovaných odběratelem. Ani nálitkování nemusí být vždy jednoznačným úspěšným řešením daného problému , ať technicky či ekonomicky , a to z mnoha důvodů . Například : vzhledem ke konstrukci odlitku velikostí tepelného uzlu a jemu odpovídající velikosti nálitku , možností výroby formy s nálitkem , zvýšení přímých nákladů na nákup podnálitkových vložek a v neposlední řadě i nižším využitím kovu ve formě spolu se zvýšenou pracností v provozu cídírny.
Z uvedeného vyplývá nutnost věnovat se hlubšímu studiu metalurgických faktorů ovlivňujících vnitřní vady homogenity při relativně konstantní kvalitě pískové formy. Vzhledem k tomu , že krystalizace grafitu je doprovázena objemovými změnami, především v oblasti tuhnutí eutektika , kdy dochází ke grafitické expanzi , si práce klade za cíl vyhodnotit vlivy sekundární (mimopecní) úpravy taveniny na průběh uvedených dilatačních dějů.

Celý výzkum by měl ukázat možnosti ovládnutí průběhu krystalizace grafitu a zejména oblast průběhu grafitické expanze v intervalu tuhnutí metalurgicky správně ošetřené tekuté litiny.

2 Literární průzkum

2.1 Charakteristika slévárenských vad homogenity u litinových odlitků - staženiny (vady odlitků ČSN 42 1240) [1]

Staženiny , jako charakteristické dutiny ve stěně odlitku (skupina vad číslo 440) rozdělujeme v rámci klasifikace vad na kategorie :

- *otevřené staženiny* (vada číslo 441)
Jedná se o povrchové otevřené prolákliny až dutiny s hrubě krystalickým zoxidovaným povrchem, které mohou zasahovat do hloubky stěny odlitku. Nacházejí se v místě tepelného uzlu , který nebyl nálitkován , nebo pod nedostatečným nálitkem po jeho odstranění. Vnější staženina vzniká důsledkem zmenšení objemu kovu během fázové přeměny - tuhnutí , vlivem významné fyzikálně–materiálové vlastnosti - teplotní roztažnosti (smrštění). Příčinou vzniku je nedostatečné doplnění taveniny do tepelného uzlu po celou dobu jeho tuhnutí.

- *vnitřní uzavřené staženiny* (vada číslo 442)
Jsou to dutiny uvnitř odlitku , které se nacházejí v horní části tepelného uzlu pod ztuhlou napájecí stěnou , vzniklé po přerušení dosazování taveniny .I v tomto případě má hlavní vliv na vznik vady objemová změna při tuhnutí taveniny v odlitku s tepelným uzlem. Rozdíl oproti předchozí vadě je především v místě vzniku tepelného uzlu , který je předurčen konstrukcí odlitku a výrobní technologií.

- *řediny* (vada číslo 443)
Jsou malé roztroušené staženiny. Vyskytují se v místě konečné fáze tuhnutí při omezené možnosti doplňování kovu filtrací taveniny mezi dendritickým síťovím u nevýrazných tepelných uzlů způsobených konstrukčně rozdílnými tloušťkami stěn, jejich křížením nebo například zaústěním zářezů vtokové soustavy. V případě relativně tlustších a delších (svislých) stěn s nevýrazným příčným teplotním gradientem se řediny nacházejí v jejich tepelné ose. Tak jako u předcházejících staženin , je příčinou vzniku ředin objemové smrštění kovu při tuhnutí a naproti tomu nedokonale vyřešená konstrukce odlitků i technologicky nezajištěné podmínky pro dokonalé usměrněné tuhnutí. U odlitků ze šedé litiny má na vznik vady , vzhledem ke grafitické expanzi při eutektickém tuhnutí taveniny, také vliv chemické složení (Se) a metalurgické úpravy taveniny (tavící agregát , obsah plynů , přehřátí taveniny, očkování , odstátí taveniny před odlitím do formy).

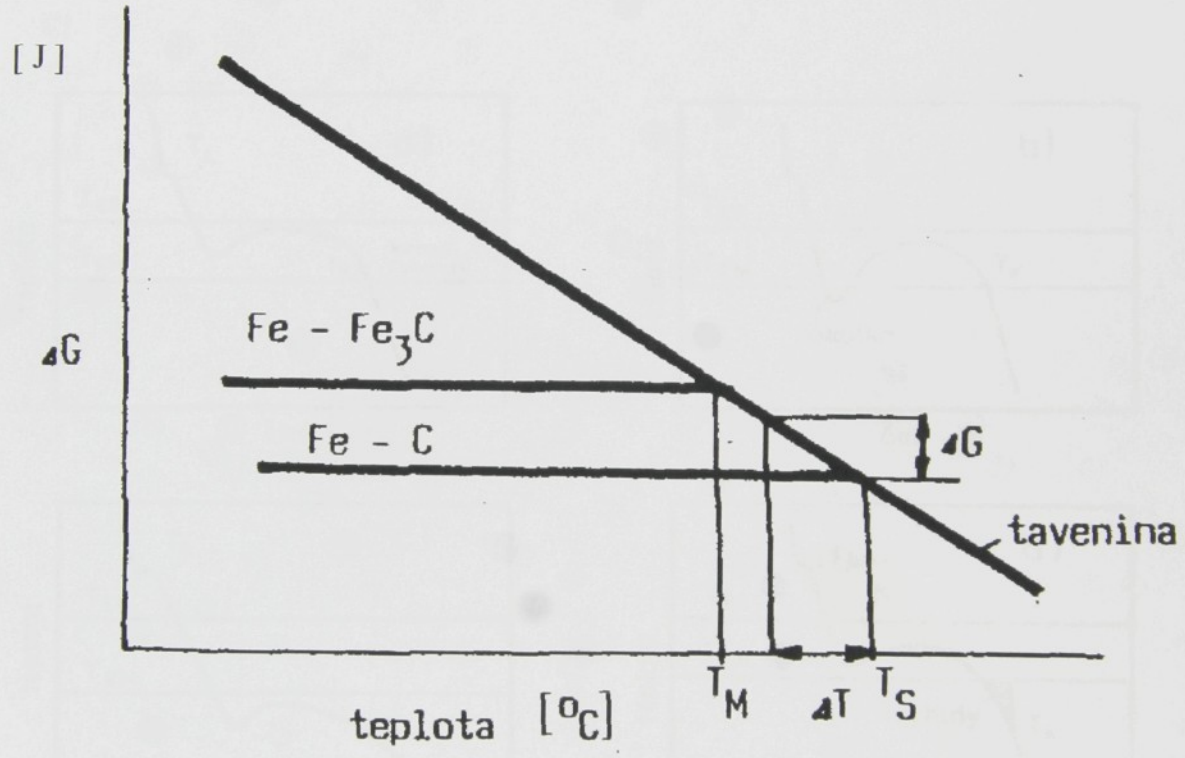
- *staženiny (řediny) od jader nebo hran formy* (vada číslo 444)
Jde o vnitřní uzavřené dutiny (staženiny , řediny) vzniklé smrštěním taveniny při tuhnutí v rámci tepelného uzlu , vyvolaného přehřátým pravým jádrem , nebo ostrou hranou pískové formy. Podmínky pro vznik vady se řídí velikostí zalitého jádra (hrany pískové formy) , jeho schopností odvádět teplo a stupněm vlastního prohřátí . Vznik tepelného uzlu je dán velkou tepelnou akumulační schopností jádra (pískové hrany), které se v krátké době přehřeje na vysoké teploty a posune tím tepelnou osu stěny blíže k jádru (k pískové hraně formy) oproti ose geometrické . Tím se silně naruší teplotní pole v daném místě a prodlouží se tak doba tuhnutí proti ostatním částem odlitku.
Nebezpečí výskytu ředin v odlitcích je o to vážnější , že se jedná o vadu skrytou , což s sebou přináší zvýšené náklady na odstranění vady (úpravou technologie nebo utěsňováním odlitků) , na nedestruktivní kontrolu jakosti odlitků a na možné externí zmetky.

2.2 Vznik vad homogenity v litinových odlitcích litých do pískových forem

Na základě studia literárních pramenů o vzniku vad homogenity v litinových odlitcích lze konstatovat, že uvedené vady vznikají během tuhnutí taveniny ve slévárenské formě, v závislosti na vlastnostech taveniny, materiálu a kvalitě formy a na konstrukci surového odlitku.
Průběh krystalizace taveniny ve slévárenské formě je provázen objemovými a lineárními změnami odlitku a prohřátých povrchových partií formy, které jsou rozhodující pro vznik vad právě během intervalu tuhnutí.

2.2.1 Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem, LLG

Litina, jako technická vícesložková slitina železa s uhlíkem, křemíkem,manganem, fosforem, sírou a dalšími prvky, je při tuhnutí charakteristická svou eutektickou krystalizací, při které je v rovnováze tavenina a tuhá fáze definovaná austenitem



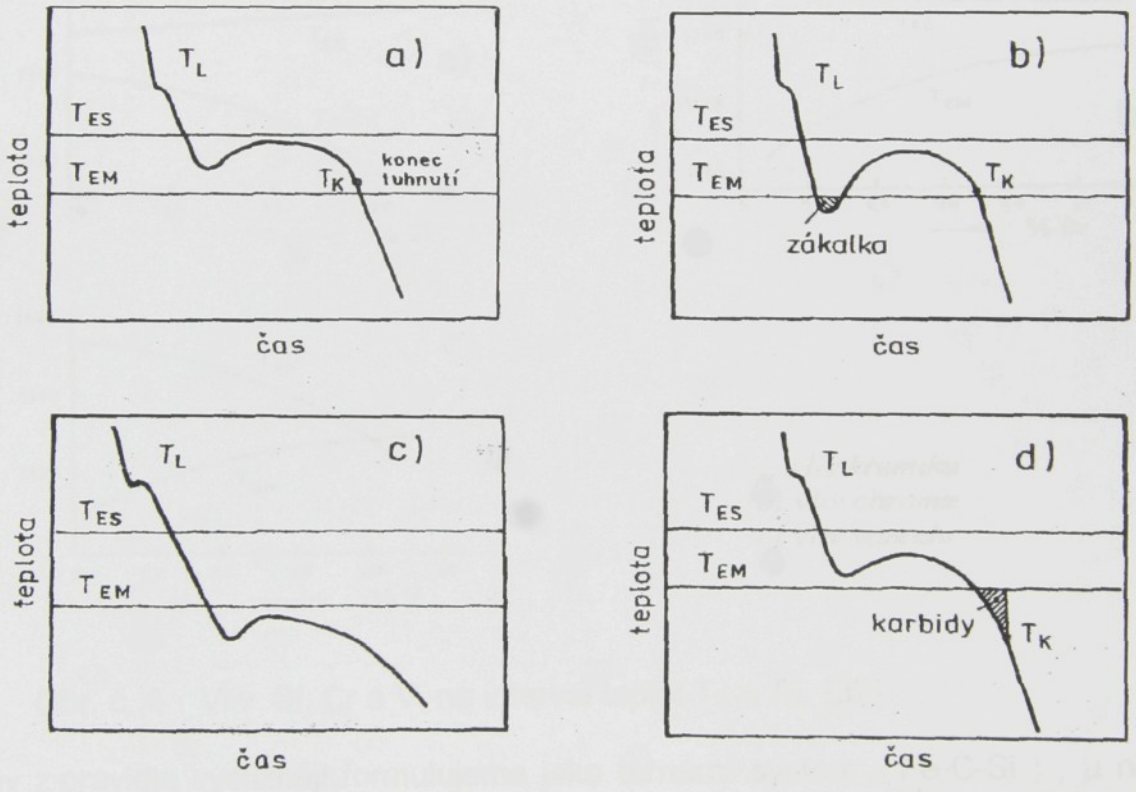
T_{EM} – teplota metastabilního eutektika
T_{ES} – teplota stabilůního eutektika
ΔT – podchlazení
ΔG – změna volné entalpie

Obr. č. 1 Vliv podchlazení na krystalizaci litin [32]

spolu s grafitem či cementitem. Eutektická prodleva rozšiřuje krystalizační pásmo teplot a určuje konečnou strukturu litin. Při stabilním tuhnutí se vysokouhlíkatá fáze vylučuje ve formě grafitu. Jedná se o litinu s lupínkovým grafitem – LLG.
Litiny však mohou krystalizovat také v metastabilní soustavě, kde se vysokouhlíkatá (kovová) fáze vylučuje ve formě cementitu (tzv. bílá litina) a při určitých podmínkách krystalizace koexistují obě formy vysokouhlíkaté fáze současně (tzv. maková litina).

Tvorba grafitického nebo ledeburitického eutektika závisí na termodynamických a kinetických podmínkách krystalizace. Termodynamické podmínky jsou dány změnou volné energie (ΔG - změna Gibbsovy energie) stabilní a metastabilní soustavy, jak je patrné na obrázku č.1. Rozhodujícím faktorem uvedených variant krystalizace je chemické složení a rychlost ochlazování. [3,32,35]

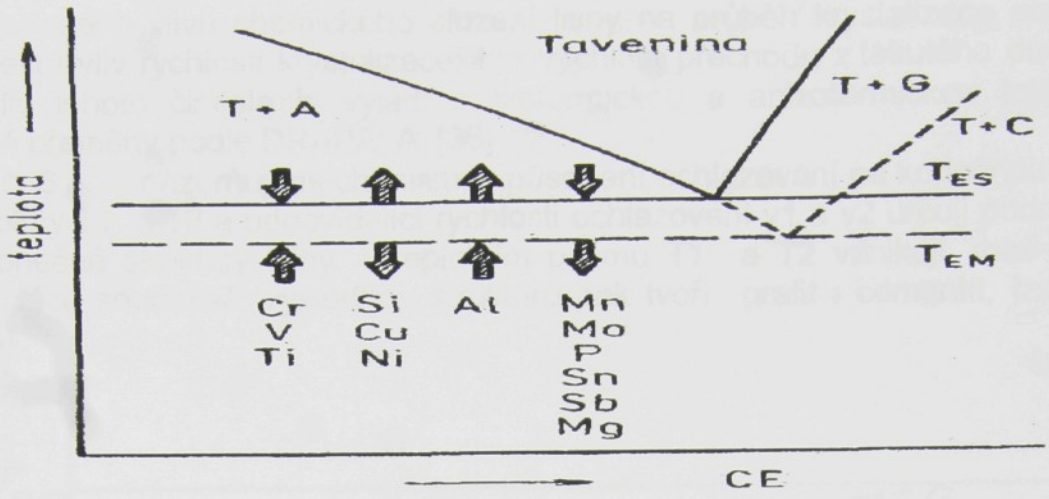
V případě binárního systému Fe–C je teplota stabilního rovnovážného eutektika T_S = 1153 °C, metastabilního eutektika T_M = 1147 °C. Rozdíl mezi oběma eutektickými teplotami činí ΔT = 6 °C. Aktivace zárodků grafitu při stabilní krystalizaci nepotřebuje velkou hodnotu volné energie ΔG, k vylučování grafitu dochází již při nízké hodnotě podchlazení, okolo 8 – 10 °C. Úroveň podchlazení však bude nabývat vyšších hodnot při snižování obsahu C v litině.
Při vysokém podchlazení dosáhne teplota taveniny hodnoty nižší než je eutektická teplota metastabilní a litina bude krystalizovat bez vylučování grafitu . Uvedené alternativy průběhu křivek ochlazování tekuté litiny během tuhnutí jsou uvedeny na obrázku č. 2.



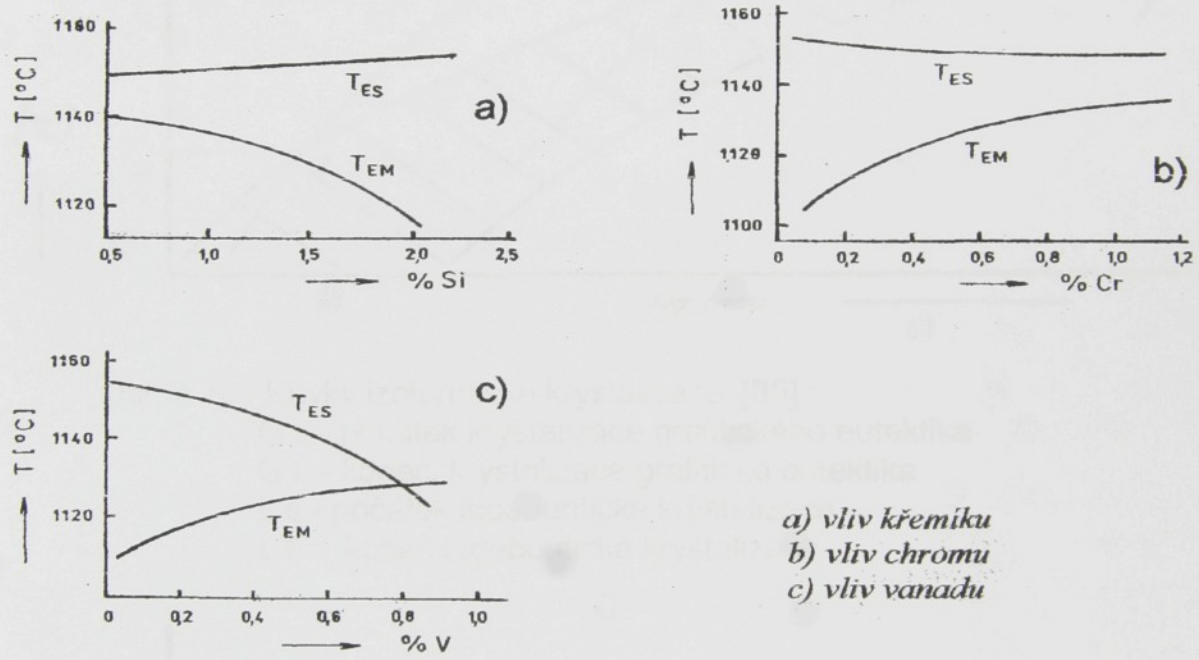
Interpretace způsobu tuhnutí pomocí křivek ochlazování:
a) tuhnutí grafitické litiny *b) vznik přechlazené struktury*
c) vznik karbidické litiny *d) vznik mezibuněčných karbidů*

Obr. č. 2 Alternativy průběhu křivek ochlazování tekuté litiny během tuhnutí [38]

Interval teplot mezi stabilní a metastabilní eutektickou krystalizací je rozhodující pro grafitizační schopnosti litiny. Jeho hodnota je ovlivňována přítomností dalších prvků v litině, které ovlivňují teploty T_{ES}, T_{EM} viz. obrázek č. 3.
Nejznámější prvky, které podporují grafitizaci, zároveň rozšiřují interval teplot mezi stabilním a metastabilním tuhnutím a naopak jsou uvedeny viz. obrázek č. 4.



Obr. č. 3 Vliv dalších prvků v litině na polohu teplot T_{ES} a T_{EM} [38]



a) vliv křemíku
b) vliv chromu
c) vliv vanadu

Obr. č. 4 Vliv Si, Cr a V na interval teplot T_S a T_M [32]

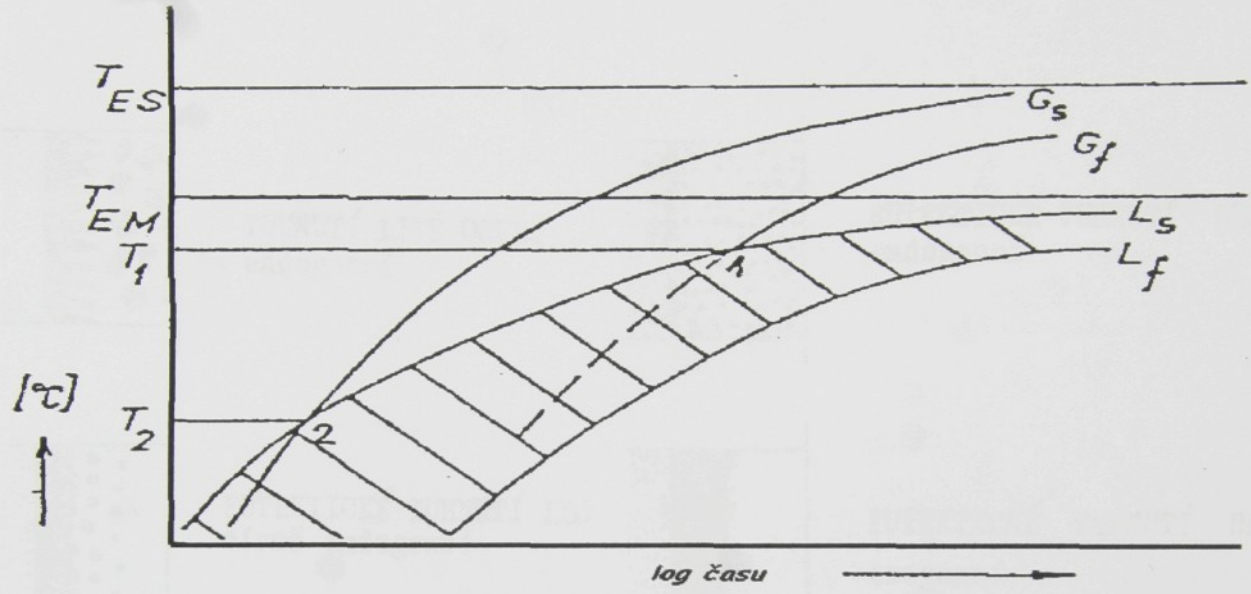
Litiny z pravidla výstižněji formulujeme jako ternární systém (Fe-C-Si) , u něhož se stupeň volnosti zvyšuje na 1 a tudíž eutektická prodleva probíhá v určitém intervalu teplot vyvolávající endogenní tuhnutí, ať dendritického či buněčného charakteru. Vliv Si (v praxi od 1 do 4 %), vedle dalších prvků Mn, P, S, ..., je podstatný, protože při stabilním tuhnutí nejvýznamněji ovlivňuje kritickou koncentraci uhlíku, tj. skutečný obsah uhlíku v eutektiku $C_{C'}$, maximální rozpustnost uhlíku v austenitu $C_{E'}$ a teplotu eutektika T_{ES} dle vztahů [3] :

$$C_{C'} = 4{,}23 - 0{,}31\ Si - 0{,}33\ P + 0{,}027\ Mn + 0{,}4\ S + 0{,}063\ Cr - 0{,}22\ Al\ [\%] \quad (1)$$

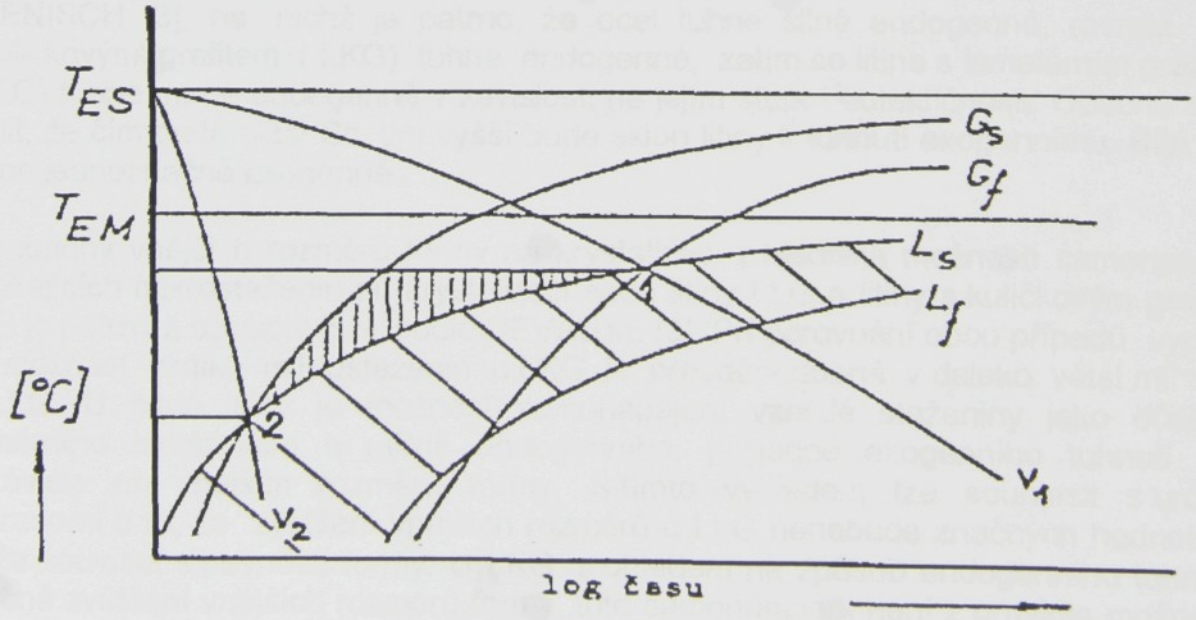
$$C_{E'} = 2{,}11 - 0{,}17\ Si \ \ldots\ [\%] \quad (2)$$

$$T_{ES} = 1153 + 6{,}7\ \%\ Si \ \ldots\ [°C] \quad (3)$$

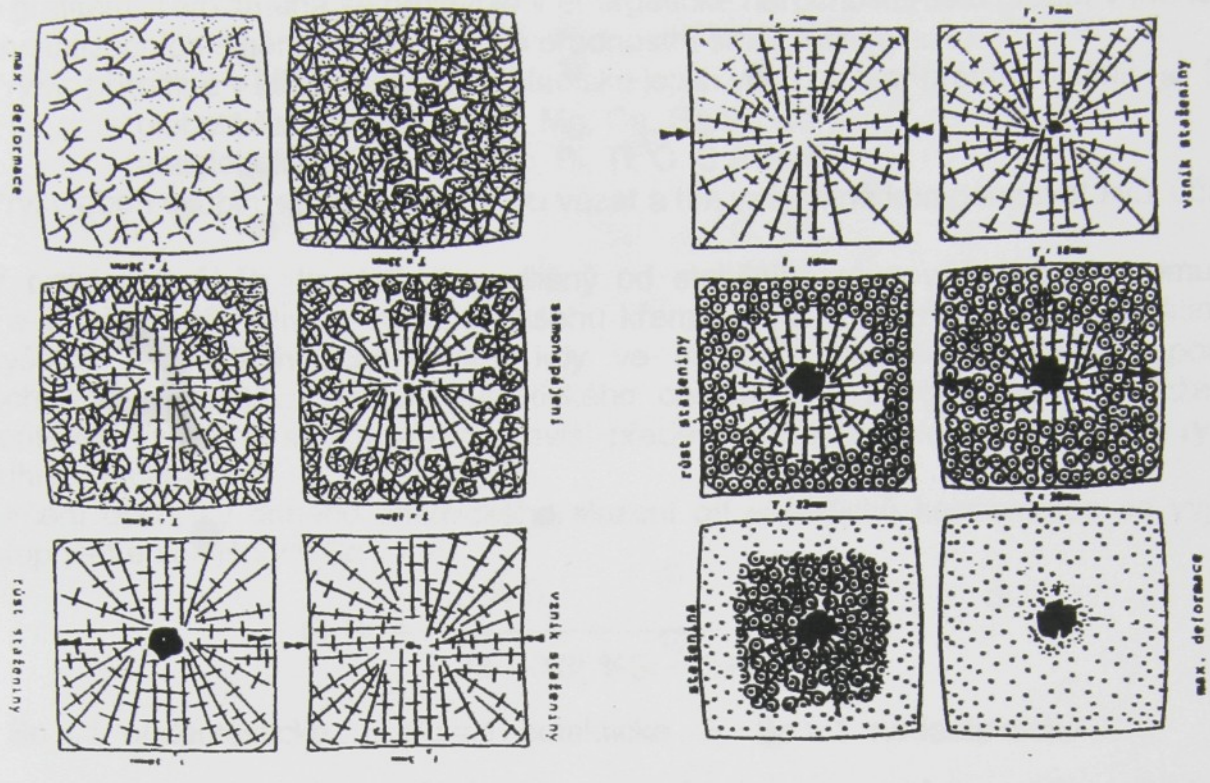
Vedle uvedeného vlivu chemického složení litiny na průběh krystalizace eutektika je nutné uvést i vliv rychlosti krystalizace, tzn. rychlost přechodu z tekutého do pevného stavu. Vliv tohoto činitele je vyjádřen izotermickou a anizotermickou transformací eutektické přeměny podle DRÁPALA. [36]
Obrázky č. 6 a 7 znázorňují mechanismus působení ochlazování na konečnou strukturu litiny. Teploty T1 a T2 a odpovídající rychlosti ochlazování v1 a v2 určují podmínky pro tvorbu konečné struktury litiny. V teplotním pásmu T1 a T2 vznikají obě vysokouhlíkaté fáze současně, výslednou strukturu pak tvoří grafit i cementit, tzv maková litina. [35]



Obr. č. 6 Křivky izotermické krystalizace [35] :
G s - počátek krystalizace grafitického eutektika
G f - konec krystalizace grafitické eutektika
L s - počátek ledeburitické krystalizace
L f - konec ledeburitické krystalizace



Obr. č. 7 Křivky anizotermické krystalizace [35]



a) b)

Obr. č.9 : Schéma tuhnutí a tvorby staženiny a) LLG b)LKG [3]

Litina obzvláště dobře splňuje podmínky průběhu heterogenní krystalizace. Iniciátorem krystalizace bývají především cizí částice – vměstky a stěny formy, které snižují energii nutnou k vytvoření nového mezifázového rozhraní a usnadňují krystalizaci již při menším přechlazení. Aby byla taková částice vhodná jako nukleační zárodek, musí splňovat podmínku nízkého mezifázového napětí mezi zárodkem a kovem (smáčivost). Tato podmínka bývá splněna zejména v případě, kdy jsou mřížky obou komponent podobné. Nejčastějším způsobem ovlivnění stavu a množství heterogenních krystalizačních zárodků litin je grafitizační očkování. Vhodné podmínky pro růst grafitu nastávají i uvnitř stěn mezi větvemi dendritů, kde jsou příznivé koncentrační poměry [38]. Grafit se v eutektiku litin vyskytuje v několika morfologických podobách, od lupínkového po kuličkový. Mezi krajními formami vzniká grafit korálkový a červíčkovitý. Dále existují degenerované tvary, mezi něž patří „chunky" a „explodovaný" grafit.

O morfologii eutektického grafitu rozhodují 2 hlavní vlivy :

- poměr G/R, kde G je velikost teplotního gradientu na mezifázovém rozhraní a R je rychlost růstu tohoto rozhraní
- přítomnost modifikačních prvků a nečistot spolu s jejich vlivem na růst fází

Podle uznávané teorie MINKOFFA a LUXE [38] se mechanismus růstu uskutečňuje na defektech krystalové mřížky třemi různými mechanismy :

- ve směru [1010] mechanismem dvoudimenzionální nukleace na planárních rovinách
- na defektech hranic, vzniklých například pootočením sousedních bazálních rovin
- ve směru [0001] mechanismem šroubových dislokací

Každá forma grafitu má svou vlastní teplotu růstu, která odpovídá určité rychlosti ochlazování a chemickému složení. Dalším důležitým faktorem je segregace nečistot z tuhnoucího kovu do zbývající taveniny, což ovlivňuje povrchové napětí mezi taveninou

a grafitem. Tato změna se projevuje v energetické náročnosti růstu grafitu v jednotlivých krystalizačních směrech a tím určuje přednostní směr růstu grafitu.
Prvky, přítomné v litině, můžeme z hlediska jejich vlivu na tvar grafitu rozdělit na [38] :

- globulitisační (Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba Ce)
- antiglobulitisační (Sb, Pb, Bi, Ti, O, S a další)

Prvky obou skupin se na sebe mohou vázat a tím vzájemně kompenzovat svůj účinek.

V praxi je průběh krystalizace odlišný od stabilního rovnovážného diagramu Fe–C především vlivem vyššího obsahu křemíku. Ten umožňuje grafitizaci litiny i při vyšších rychlostech ochlazování, kdy ve struktuře převládá perlit. Při pomalém ochlazování nastává rozpad eutektického cementitu a kovová matrice může být i feritická. Výsledná struktura tedy závisí především na chemickém složení a rychlosti tuhnutí a chladnutí.
Určení odchylky daného chemického složení od eutektické koncentrace se vyjadřuje stupněm eutektičnosti Sc.

$$Sc = \frac{\%\ C}{4{,}23 - 0{,}3(\ \%Si + \%P\ )} \qquad (4)$$

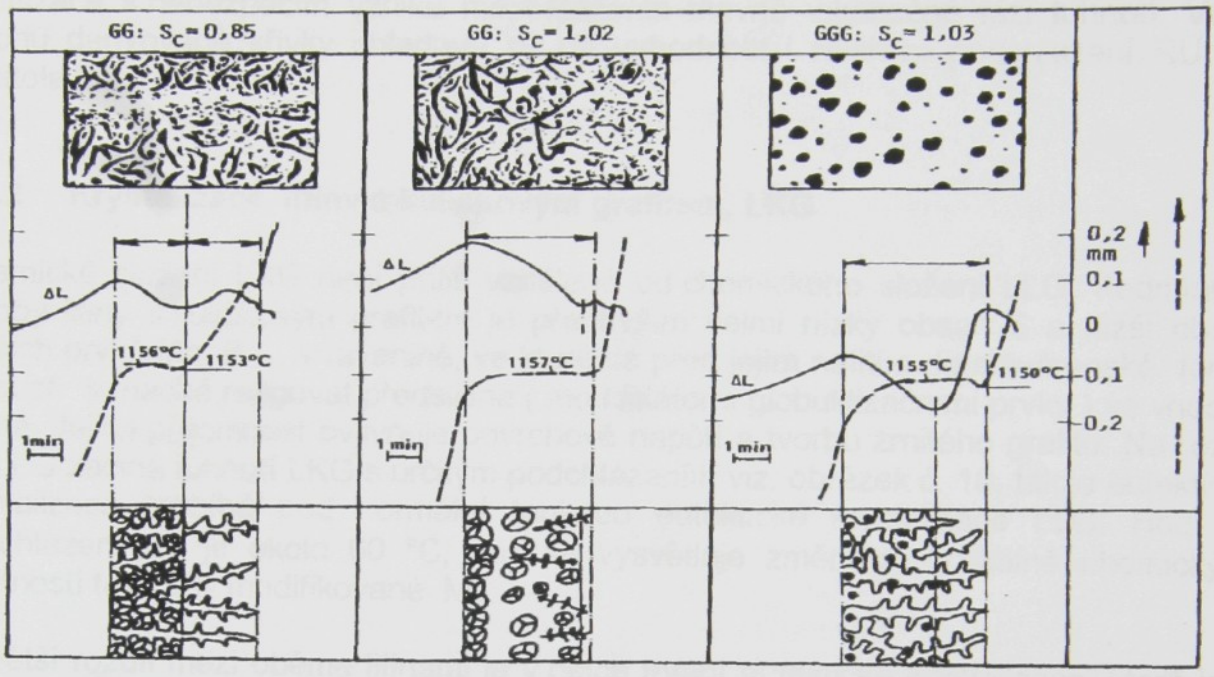
Sc < 1 podeutektické , Sc = 1 eutektické , Sc > 1 nadeutektické

Podeutektická šedá litina začíná tuhnout vylučováním dendritů austenitu, jejichž růst je podmíněn cizími zárodky nacházejícími se v tavenině a pokračuje tuhnutím grafitového eutektika, které je tvořeno austenitem a grafitem v uspořádání „eutektických buněk". Jedná se o prostorové grafitové útvary, jejichž růst byl podnícen z jediného krystalizačního zárodku, k jehož růstovým plochám difundují atomy uhlíku z okolní taveniny. Velikost a vnitřní stavba eutektických buněk je závislá na počtu zárodků, stupni přehřátí, rychlosti ochlazování a různých úpravách taveniny, jako očkování, vibraci atd. Toto tuhnutí se v praxi blíží více anizotermické krystalizaci, při které lze dosáhnout jak stabilní tak metastabilní struktury v závislosti na rychlosti ochlazování taveniny.
Při vyšších rychlostech ochlazování se tvoří jemnější lupínky grafitu, až ke struktuře přechlazeného grafitu. Ten může vytvářet oblasti, které zřetelně ohraničují původní dendrity austenitu.
Tuhnutí *nadeutektické šedé litiny* začíná vylučováním primárního grafitu ve tvaru hrubých vloček. Nejde o zcela čistý krystalický (hexagonální) grafit (obsahuje 88 – 97 % C) , ale je nutno počítat s přítomností nečistot, které tvoří vměstky. Po intenzivním leptání zůstane grafitová kostra s vměstky (SiO_2, TiC, FeO). [2]
Tavenina se postupně ochuzuje o uhlík a při dosažení eutektické teploty dosáhne eutektického složení.
Tuhnutí *eutektika* pak probíhá stejně jako u podeutektické litiny.

Ve všech případech krystalizuje poslední tavenina při stabilním tuhnutí v místě tepelného uzlu, ve stěnách nebo nálitcích. Tato tavenina (v případě vícesložkové slitiny, jakou litina je) obsahuje vedle odpovídající koncentrace základních prvků (C, Si, Mn) i prvky doprovodné (P, S, ...), které segregují a vytvářejí tak koncentrace, kdy je tato tavenina tekutá hluboko pod teplotu solidu grafitického eutektika. Nejznámější vzniklou sloučeninou je fosfidické ternární eutektikum tzv. steadit, tuhnoucí okolo 950 °C. [39]

Rozdílnost v tuhnutí eutektika LLG a LKG je znázorněno na obrázku č.10 , který obsahuje morfologii tuhnutí, teplotní křivky a křivky lineárních dilatací , jak je zjistil při svých měřeních HUMMER [9]. Z obr.10 vyplývá, že u LLG probíhá tuhnutí eutektika v celém objemu, zatím co u LKG za stejnou dobu proběhlo tuhnutí austenitu,

doprovázené lineárním smrštěním s následným zvětšením rozměrů v důsledku krystalizace grafitu. Lze tedy konstatovat , že čím vyšší je stupeň eutektičnosti litiny, tím více má litina snahu tuhnout endogenně a naopak. Endogenní tuhnutí inklinuje ke vzniku mikrostaženin a naopak exogenní tuhnutí vytváří předpoklad ke vzniku soustředěné staženiny.



Obr. č.10 Schéma tuhnutí podeutektické LLG a eutektické LLG, LKG [9]

Šedé litiny používáme převážně jako litiny podeutektické (Sc = 0,8 – 0,95) , zatímco tvárné litiny ve většině případech jako litiny eutektické (Sc = 0,95 – 1,15) což se odráží i v rozdílné krystalizaci a potvrzuje se tímto, proč mají tvárné litiny větší sklon k vnitřním mikro-staženinám než litiny šedé.
Tomu také odpovídají zjištěné povrchy vnitřních staženin [3]. U LLG se vyskytuje dendritická stavba dvoufázového pásma s grafitickými shluky eutektického grafitu oproti LKG, kde je kuličkový grafit v základní kovové hmotě a dendritická stavba chybí. Skutečnost závažnosti výskytu vad u odlitků z LKG potvrzují i přejímací podmínky pro zaručení jejich vnitřní homogenity.

Krystalizace grafitu je doprovázena objemovými a lineárními změnami, hlavně v období tuhnutí eutektika. Dochází k tzv. grafitické expanzi, jejíž působnost je tím větší, čím více působí v tekuté fázi, což nastává právě při exogenním tuhnutí. Krystalizační fronta pak postupuje do tepelného uzlu jako celistvá vrstva sousedící přímo s taveninou. Vylučující se grafit (převážně v tavenině) významně zvětšuje její objem a tím kompenzuje smrštění, které transformační děj tuhnutí taveniny doprovází.

V případě endogenního tuhnutí se vylučující grafit ihned obklopuje austenitem v ostrůvcích, vznikajících uvnitř taveniny před vlastní krystalizační frontou. Grafitická expanze, k níž při tom dochází, se rozptyluje částečně i do vznikajících ostrůvků pevné fáze, přičemž se zvětšuje lineární roztažení na úkor objemového zvětšení taveniny. [3]
Je ovšem velmi obtížné určit podmínky endogenního, nebo exogenního tuhnutí, které závisí především na : - chemickém složení
- zárodkování pevné fáze (grafitu, austenitu)
- na vnějších podmínkách krystalizace

Z hlediska dobré metalurgické kvality taveniny je vhodné, aby grafitizace v průběhu eutektického tuhnutí měla rovnoměrnou intenzitu a teplota konce tuhnutí Tsol byla dle NANDORIHO a GEDEONOVÉ [6] co nejvyšší.
Intenzita tuhnutí se dá posoudit podle úhlu sklonu (tgβ) derivované křivky chladnutí při tuhnutí eutektika. Velký úhel sklonu β svědčí o nerovnoměrné intenzitě eutektické grafitizace s nebezpečím vzniku mikrostaženin hlavně v konečné fázi tuhnutí. Vedle sklonu derivované křivky chladnutí se dá vyhodnotit i relativní podchlazení RU viz. kapitola 2.6.2.

2.2.2 Krystalizace litiny s kuličkovým grafitem, LKG

Chemické složení LKG není příliš vzdálené od chemického složení LLG. Podmínkou výroby litiny s kuličkovým grafitem je především velmi nízký obsah S a nižší obsah dalších prvků Mn, P ... v tavenině, ve které se před jejím nalitím do slévárenské formy rozpustí a nechá reagovat předslitina (modifikátor s globulitizačními prvky) ve vhodné formě. Jejich přítomnost ovlivňuje povrchové napětí a tvorbu zrnitého grafitu. Na rozdíl od LLG začíná tuhnutí LKG s určitým podchlazením viz. obrázek č. 10, takže eutektická krystalizace probíhá pod normální teplotou eutektické krystalizace LLG. Hodnota podchlazení ΔT je okolo 60 °C, což se vysvětluje změnou fyzikálně chemických vlastností taveniny modifikované Mg.

Největší rozdíl mezi oběma litinami je v délce trvání eutektické krystalizace, která je u LKG podstatně delší. Je to především proto, že zrna grafitu nerostou v kontaktu s taveninou, ale vyrůstají obklopena austenitickým obalem, jímž musí difundovat atomy uhlíku ke grafitovému centru.
Příčina difuze uhlíku ke grafitu přes austenitický obal se vysvětluje koncentračním spádem uhlíku v austenitické obálce. Vnější okraj obálky narůstající z taveniny má vyšší obsah uhlíku (vyšší koncentrace uhlíku v austenitu způsobená potřebným podchlazením tj. prodloužením křivky solidu při metastabilní rovnováze s austenitem). Vnitřní okraje obálky jsou naopak na uhlík chudší, jejich koncentrace odpovídá (při uvažovaném podchlazení) nižší než maximální rozpustnosti uhlíku v austenitu při rovnováze austenitu s grafitem. V důsledku tohoto koncentračního spádu probíhá difuze atomů uhlíku austenitem směrem k rostoucímu zrnu grafitu, které proto narůstá i po ztuhnutí veškeré taveniny. Difuze uhlíku ke grafitu je usnadněna protisměrnou samovolnou difuzí železa z tohoto krystalického útvaru. Nebo je obálka grafitového zrna během růstu nekontinuální a jednotlivá zrna austenitu jsou od sebe navzájem a od rostoucího zrna grafitu oddělena tenkou vrstvou taveniny, kterou může dobře difundovat uhlík z volného objemu taveniny k narůstajícímu grafitu, kde se ukládá.

K tvorbě kuličkového grafitu jsou potřebné přídavné prvky, které sníží obsah kyslíku v tavenině a podnítí růst grafitu globulárního tvaru. [24] Jako modifikační prvek se používá především Mg a to buď čistý či v předslitinách, a nebo společně s Ce a KVZ. Obsah Mg, který je rozpuštěn v tavenině po proběhnutí odsíření, desoxidaci a dalších ztrátách se nazývá zbytkový – Mg_{zb} . Pro dosažení kuličkového tvaru grafitu je třeba obsah Mg_{zb} vyšší, než cca 0,025 %. Obvyklý obsah pak bývá Mg_{zb} = 0,03 – 0,06 %. [38]

Modifikátor ovlivňuje růst grafitu jednak odstraněním rozpuštěných povrchově aktivních látek (kyslík z cca 100 ppm na cca 30 ppm, síra), jednak adsorpcí modifikátoru na bočních rovinách grafitového krystalu [23]. Povrchové napětí roztavené litiny vzroste po

modifikaci o 30 – 50 %. Vazba mezi základními rovinami grafitového krystalu je velmi slabá , což může vést k tomu, že se krystal raději snaží zachovat minimální povrch, než dodržet krystalografický směr. [24]

Podeutektické tuhnutí začíná vylučováním austenitu ve formě rozvětvených krystalů – dendritů. Tento proces pokračuje až do doby, kdy se zbytek taveniny ochladí pod eutektickou teplotu. Při podchlazení se austenit vylučuje současně s grafitem, kolem kterého tvoří obálky, a v případě, že je ochlazování dostatečně pomalé způsobuje rekalescenci na eutektickou teplotu. Grafiticko – austenitické eutektické buňky se připojují jedna k druhé, ale také na větve dendritů tvořených primárním austenitem.

Nadeutektické tuhnutí je podobné tuhnutí podeutektickému s tím rozdílem, že vedoucí fází, která se vylučuje jako první, a proto se v tavenině může do jisté míry volně pohybovat, je primární globulární grafit. Po dostatečném podchlazení pod eutektickou teplotu se současně vylučuje austenit i grafit stejně jako při podeutektickém tuhnutí. Grafiticko – austenitické globule, eutektické buňky, se tvoří po vrstvách, které jsou kolmé ke směru odvodu tepla z odlitku. Tento jev se u podeutektických litin nevyskytuje, protože vedoucí fází je austenit se svým dendritickým síťovím. Výsledkem bude rovnoměrné rozložení eutektických buňek, závislé pouze na gradientu koncentrace uhlíku v tavenině. Struktura vrstvového typu končí bezgrafitickou vrstvou považovanou za hranice eutektických buněk, která obsahuje eutektický austenit v pseudodendritickém stavu spolu s nekovovými vměstky a všemi typy karbidů. Toto ohraničení má další opodstatnění v pohybu jednotlivých fází v tavenině během jejího tuhnutí. Na rozdíl od pomalého pohybu dendritů austenitu v tavenině, vlivem malého rozdílu měrné hmotnosti obou fází (tavenina i austenit mají hodnotu cca 6,9 $g.m^{-3}$), vykazuje grafit, vzhledem k rozdílné hustotě mezi ním a tekutým železem (cca 4,8 $g.m^{-3}$), pohyb v tavenině rychlostí odpovídající Stokesovu zákonu. Ta je přímo úměrná především velikosti grafitové kuličky a nepřímo úměrná rychlosti ochlazování taveniny. [24]

2.2.3 Krystalizace litiny s červíkovitým grafitem, LČG

LČG se svými slévárenskými vlastnostmi blíží LLG, naproti tomu užitné vlastnosti se přibližují LKG. Charakter tuhnutí je podobný tuhnutí LKG především svou výraznější eutektickou reakcí a také proto, že je v matrici vždy obsaženo menší, či větší množství zrnitého grafitu. Základní rozdíl je ve výsledném tvaru grafitu, který je charakteristický tzv. vermikulárním - červíkovitým tvarem.
Ten vzniká obvykle ve dvou případech :

- při modifikaci malým množstvím sferoidizačních prvků, které nezajistí dokonale zrnitý tvar grafitu. Mg_{zb} je obvykle 0,01 – 0,02 %. LČG podporují i prvky KVZ.
- za přítomnosti některých antiglobulitizačních prvků, obvykle Ti, případně Al, které zablokují tvar červíkovitého grafitu i při poměrně vysokém obsahu Mg.

Z uvedeného vyplývá, že červíkovitý grafit vzniká za jakési rovnováhy mezi oběma skupinami prvků a jeho růst může probíhat částečně podle mechanismu růstu kuličkového grafitu i podle lamelárního grafitu. Podle toho se pak morfologie červíkovitého grafitu blíží více jedné, nebo druhé formě. [38]

2.2.4 Ovlivňování krystalizace litin – očkování

Očkování je dnes nejrozšířenější způsob ovlivňování krystalizace litin. Pokud je krystalizace spojena s větším přechlazením, znamená to, že v tavenině chybí dostatek vhodných zárodků ke krystalizaci.[2] Přechlazení se sníží, když ve vhodnou dobu před

vyplněním dutiny formy do taveniny přidáme vhodné látky (předslitiny), které musí splňovat určitá kritéria :

- reagují s volným kyslíkem v tavenině za vzniku oxidů na nichž rostou další zárodky nebo přímo krystalizuje uhlík ve formě grafitu
- jsou obsažené v tavenině dané slitiny již nad počáteční teplotou tuhnutí v krystalickém stavu
- mají malý kontaktní úhel smáčení s taveninou
- mají vyhovující mřížkovou příbuznost s podněcovanou krystalickou fází

Hlavním cílem této úpravy taveniny u LLG je zlepšení užitných - mechanických vlastností litiny v odlitcích, čehož se dosahuje prostřednictvím [37]:

1. Eliminace vzniku zákalky (ledeburit) v matrici odlitku – lepší obrobitelnost.
2. Zvětšením počtu účinných zárodků pro krystalizaci grafitové složky anomálního eutektika - zmenšení velikosti a zvětšení počtu grafitických lupínků typu A.
3. Snížením rozdílu výsledných struktur v odlišných tloušťkách stěn.
4. Relativní stabilizací perlitu a částečným snížením pnutí v odlitcích.

Z termodynamického hlediska je pro podmínky očkování určující stabilita vylučování grafitu z přesyceného roztoku tekuté litiny. Uvažujeme alternativy, kdy se grafit může vylučovat cestou přímou (z roztoku se vylučuje přímo uhlík ve formě grafitu) či nepřímou (předpokládá se tvorba chemických sloučenin, při jejichž rozpadu vzniká uhlík ve formě grafitu).
K tomu, aby se uhlík vylučoval ve formě grafitu, musí být aktivita uhlíku $a_c = 1$, při hodnotě nižší ke vzniku grafitu nedochází. Aktivita uhlíku je tedy podmínkou pro tvorbu grafitu. Protože litina je komplexní slitina a tvoří ji další prvky, je nutné uvažovat o jejich vlivu na aktivitu uhlíku.

Příklad přímé cesty : $[\,C\,] = C_{gr}$ $\quad \Delta G = RT \ln a_c$ $\quad Fe_3C \rightarrow 3\,[\,Fe\,] + C_{gr}$ (5)

Příklad nepřímé cesty : například Ca, Zr, Ti dle reakce

$$Ca + m\mathrm{Si} + n\mathrm{C} = p\mathrm{CaSi} + g\mathrm{Ca_2Si} + r\mathrm{CaC_2} \qquad (6)$$

Produkty reakcí nepřímé cesty se rozpouštějí a tvoří oblasti přesycené C a Si, následuje přímá cesta vylučování grafitu. Mezi prvky, které jsou schopny způsobovat vylučování grafitu (zvyšují a_c , snižují rozpustnost C v roztoku) patří Al, Si, Cu, Co, Ni, P .
Mezi prvky, které snižují a_c a vytvářejí stabilní sloučeniny nezávisle na koncentraci a teplotě, patří Cr, Mn, Mo, V . [35,54]

Nejdůležitější skupinou vměstků pro iniciaci krystalizace grafitu jsou oxidy.
Velmi účinně působí v tomto směru rovněž nitridy, karbidy, sirníky a volný grafit.
Množství oxidických vměstků v litině závisí na obsahu volného kyslíku, který je v tavenině přítomen. Již PATTERSON [2] byl toho názoru, že litina z kuplovny je bohatší na volný kyslík než z elektrické indukční pece, a proto je její grafitizace dokonalejší. Předpokládá se, že tzv. dědičnost litiny může být pravděpodobně připisována právě určitému stavu zárodků, které jsou vnášeny do litiny především surovými železy, v nichž mají velkou úlohu plyny (vodík, kyslík) a ovlivněny způsobem tavení.

Očkováním dochází ke kvalitativní změně v krystalizačním procesu za minimální změny chemického složení litiny. Čistý křemík použitý jako očkovadlo je bez účinku, pokud nejsou přítomny některé prvky, které zvyšují jeho aktivitu tím, že umožní vytvořit

stabilní oxidy o vysoké teplotě tavení. Jsou to prvky jako Al, Ca, Zr, Sr, Ba. Tenkostěnné odlitky, které by jinak tuhly ledeburiticky, se dají odlévat právě proto, že se očkováním zmenšuje přechlazení grafitického eutektika. K tenkostěnným odlitkům se rovněž vztahuje očkování litiny s vyšším stupněm eutektičnosti ($Sc \geq 1$) využívané pro zamezení vzniku zákalky a lepší zabíhavost. Očkováním podporujeme heterogenní nukleaci při grafitizaci.

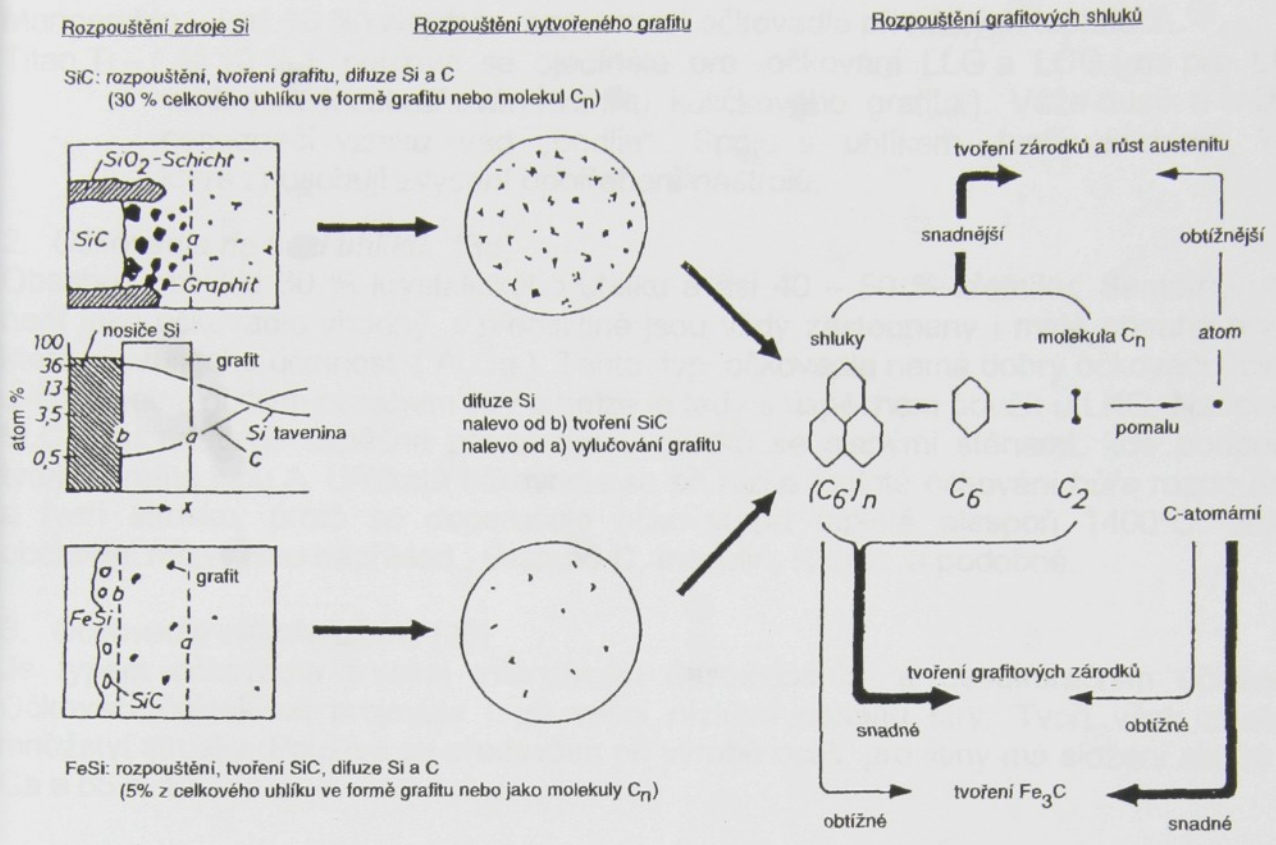
Důležitou součástí procesu očkování je zrnitost a množství očkovadla. Zrnitost je důležitá pro správné a úplné rozpuštění očkovadla v tavenině a je přímo úměrná množství upravované taveniny, tloušťce stěny odlitku a stupni přehřátí tekutého kovu. Množství očkovadla se pohybuje od 0,1 do 1,0 % (nejběžněji 0,20 %) na hmotnost tekutého kovu, v závislosti na metodě, účinnosti očkovadla a tloušťce stěny vyráběných odlitků. Na ověření správné zrnitosti a množství pro jednotlivé odlitky se používá zkouška s odstupňovanou tloušťkou stěny pro mechanické (měření tvrdosti) a metalografické vyhodnocení .

Teorií vysvětlujících podstatu očkování je několik :

a) Jedna z nejstarších teorií je založena na příbuznosti mřížky grafitu a některých vměstků, především SiO_2. Podmínkou však je, aby tavenina byla bohatá na volný kyslík , čímž jsou vytvořeny příznivé podmínky pro vznik oxidických zárodků grafitizace /2/, a nebo aby alespoň jeden z parametrů mřížky měl stejný rozměr (odchylka 5 %), jako v případě SiC. [35]

b) Jiná teorie vychází z toho, že přísada křemíku posouvá eutektický bod litiny.
V objemech, kde se rozpustilo očkovadlo bohaté křemíkem (FeSi) pak dochází k nadeutektické koncentraci litiny. Zde je pak možné očekávat vylučování primárního grafitu jako zárodku pro růst grafitu eutektického. [2]
Při očkování předslitinou FeSi75% je v místě rozpouštění koncentrace Si = 75 % a tvoří se sloučenina SiC, která je při této koncentraci stabilní. Při dalším rozpouštění klesá koncentrace Si, až dosáhne hodnoty 22 %. Při této a nižší koncentraci dochází k rozpadu SiC za vzniku grafitu. Klesne-li koncentrace Si pod 3 %, nedochází k očkovacímu efektu. Proto křemík tvoří základ grafitizačních očkovadel.[35]
Posunutí eutektického bodu litiny se dosáhne i při použití očkovadla na bázi grafitu (Gramod, SiC, Inoculin). Mechanismus očkujícího účinku a zvláštnosti, ke kterým při rozpouštění SiC dochází, je vysvětlen na obrázku č. 11.
V tavenině se v tomto případě tvoří větší množství grafitu, který je jinak rozdělen a v jiné formě, než je tomu v případě roztavení očkovadla FeSi. V oblastech, kde dochází k rozpouštění očkovadla, se místně zvýší koncentrace prvků nad eutektickou hodnotu, a vznikají po jistou dobu termodynamicky stabilní grafitové shluky molekul Cn. Tyto uhlíkaté shluky sehrávají pravděpodobně důležitou úlohu svým předočkovacím účinkem. [8,35]

c) Další teorie je založena na dezoxidačních účincích očkovacích přísad, které spolu s reakcemi s dalšími plyny (dusíkem, vodíkem) jsou předpokládanou podmínkou změny krystalizace litiny. Při měření aktivity kyslíku v tavenině bylo zjištěno, že těsně po naočkování došlo ke snížení obsahu kyslíku a ztrátě očkovacího účinku a tzv. časový účinek očkovadla tu lze vysvětlit zpětnou oxidací litiny. [21]



Obr. č. 11 Znázornění mechanizmu grafitického očkování při použití SiC a FeSi [8]

Mezi nejpoužívanější očkovadla patří:

1. *Očkovadla na bázi křemíku.* [35,37,38]
Nejběžnějším druhem je ferosilicium,jako například FeSi75%, FeSiCa, FeSiMn ...
Tato očkovadla mají stálý obsah Si (65 - 75 %) a dále přídavek vhodných prvků zvyšujících účinnost očkovadla, zbytek tvoří Fe,například:

Hliník Al – (1 - 2 %) je běžně přítomen ve feroslitinách, ale jeho samotná účinnost je malá. Obsah vyšší jak 1,5 % je nevhodný vzhledem k výskytu slévárenské vady „bodlina" při odlévání do syrových forem.

Baryum Ba - (1 – 6 %) je silný grafitizační prvek, který zajišťuje prodlužování očkovacího účinku vlivem chemicky stálých zárodků s vysokou hustotou, které se jen pomalu vyplavují do strusky. Nad obsah 3 % může způsobovat struskové vady. Ukazuje se, že u odlitků litých do měkkých, málo vypěchovaných forem s ostrými hranami, současně při vysokém počtu eutektických buněk, může být Ba jednou z příčin vzniku staženiny.

Vápník Ca – (0,2 – 1,5 %) středně účinný očkovací prvek, který je přidáván ve spojení s dalšími prvky u tavenin se sírou při obsahu pod 0,05%.

Stroncium Sr - (0,5 – 1 %) nejúčinnější očkovadlo pro LLG se středním a vysokým obsahem síry obsahující cca 1 % Sr. Zvyšuje rychlost rozpouštění očkovadla a to i při nízkých očkovacích teplotách (kolem 1300 °C) Účinně zabraňuje vzniku zákalky ve slabých stěnách, prodlužuje dobu účinku a jen málo zvyšují počet eutektických buněk.

Zirkon Zr - (1 – 6 %) středně účinný očkovací prvek, dobře redukující zákalky. Částečně ovlivňuje morfologii grafitu a to především u litin s vysokým uhlíkovým ekvivalentem. Očkovadla se Zr úspěšně eliminují dusík, který se do taveniny dostává z některých druhů jader. Zr tvoří s dusíkem neškodné vměstky ZrN_2.

Mangan Mn – (až 10 %) zlepšuje rozpustnost očkovadla při nízkých teplotách.
Titan Ti – (až 10 %) používá se ojediněle pro očkování LLG a LČG (ne pro LKG vzhledem k zabraňován í vzniku kuličkového grafitu). Váže dusík a snižuje nebezpečí vzniku vad „bodlin". Spolu s uhlíkem tvoří karbidy TiC, které způsobují zvýšení opotřebení nástrojů.

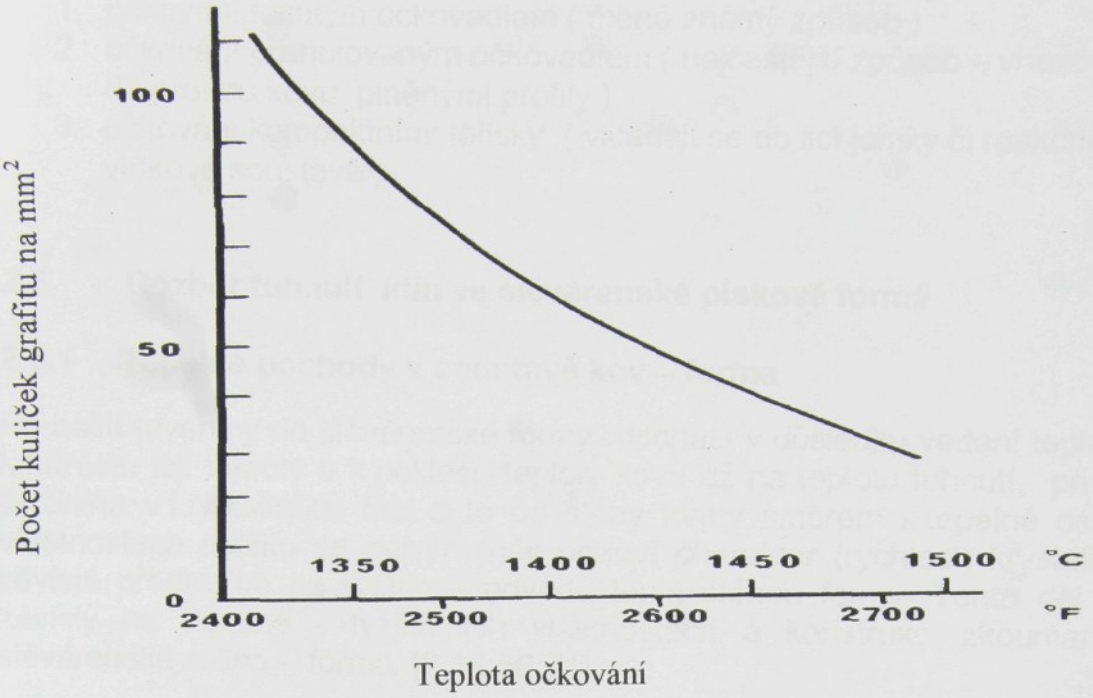
2. *Očkovadla na bázi uhlíku.* [38]
Obsahují obvykle 30 % krystalického uhlíku a asi 40 – 50 % křemíku. Samotný uhlík není jako očkovadlo vhodný, v předslitině jsou vždy zastoupeny i malé obsahy prvků, které zvyšují jeho účinnost (Al,Ca). Tento typ očkovadla nemá dobrý očkovací účinek u litin s velmi nízkým obsahem síry a nelze je tedy s úspěchem použít u LKG. Naopak u LLG jsou relativně úspěšná především u odlitků se slabými stěnami, kde podporují tvorbu grafitu typu A. Uhlíkatá očkovadla se při nízké teplotě očkování hůře rozpouštějí a tvoří strusku, proto se doporučuje očkovat při teplotě alespoň 1400°C. Jejich obchodní názvy jsou například : Gramod-C, Inoculin, Ranco a podobně.

3. *Očkovadlo silikokalcium* . [38]
Je typem očkovadla s velmi intenzivním desoxidačním a desulfuračním účinkem. Očkovací účinek se projevuje i při velmi nízkém obsahu síry. Tvoří však značné množství strusky. Používá se především při výrobě oceli, pro litiny má složení asi 30 % Ca a 65 % Si.

4. *Očkovadlo karbid křemíku.* [8,35,38]
Je očkovadlo, které se začalo požívat v posledních letech. Za teplot vyšších jak 1700°C disociuje. V litině se tedy netaví, ale postupně rozpouští. Tím je docíleno dlouhodobého účinku očkovadla. Rozpouštění SiC má, na rozdíl od FeSi , endotermický charakter, což vysvětluje stabilitu zárodků i při vyšších teplotách taveniny. Očkovadlo obsahuje obvykle 85 – 90 % SiC . Grafitizační očkování karbidem křemíku se s výhodou uplatňuje především při výrobě LKG a to i v případech, kdy vsázku tvoří pouze ocelový šrot.
Kromě očkovacího účinku má příznivý vliv i na krystalizaci primárního austenitu snížením podchlazení při jeho nukleaci , zvýšením počtu dendritů a zkrácením jejich délky, což následně podporuje vznik grafitu typu A [72] při krystalizaci eutektika.

Zásadní změny po naočkování u LLG lze zjistit v mikrostruktuře. Změna je patrná především na typu grafitu, který se mění z forem lupínkových přechlazených (D,E) na formu nepřechlazenou (A). V kovové matrici jsou změny charakterizovány tím, že se očkováním celkově potlačuje vylučování feritu.To je spojeno především s vylučováním grafitu typu A, kdy difuzní dráhy uhlíku jsou delší, než je tomu např. při krystalizaci mezidendritického grafitu.To vede ke stabilizaci perlitu, k nárůstu pevnosti a k zamezení vzniku ledeburitu. [2]

Sekundární očkování LKG je posledním krokem v procesu její výroby. Tavenina modifikovaná předslitinami typu FeSiMg je více méně v „poloočkovaném" stavu. Tento stav závisí na teplotě tuhnutí slitiny, přidaného množství modifikátoru a na zbytkovém obsahu Mg a Ce, protože jejich nadměrné množství může zapříčinit tvorbu karbidů. Proto je téměř vždy nutné ještě následné oddělené očkování a to větším množstvím než je běžné u LLG. [37] Přidáním malého množství látky do modifikované taveniny se vytváří heterogenní zárodky, na kterých krystalizují a rostou kuličky grafitu. a rostou kuličky grafitu. Všeobecně rozšířené pravidlo nejprve modifikovat a potom očkovat je tradiční a stále platné. Zlepšuje výslednou strukturu zvýšením počtu grafitových kuliček, pomáhá k vytváření pravidelného tvaru a brzdí tvorbu karbidů. Výsledkem jsou relativně ustálené mechanické vlastnosti odlitků. Výzkum KARSAYA [24] ukázal, že účinnost klesá s rostoucí očkovací teplotou viz obrázek č. 12.



Obr. č.12 Vliv teploty očkování na výsledné množství kuliček grafitu v LKG [24]

Tato zjištění jsou v souladu s tvrzením, že očkování po modifikaci jsou efektivnější, protože se provádí do taveniny ochlazené modifikačním procesem spolu s lepším využitím doby očkovacího účinku. Ten totiž s časem a se zvýšenou teplotou slábne, takže nejvýhodnější je očkovat modifikovanou taveninu těsně před odléváním, jehož doba by neměla překročit cca 10 minut.

Výběr očkovadla pro LKG závisí na druhu použitého modifikátoru, obsahu vzácných zemin a odeznívaní očkovacího účinku očkovadla.Očkovadla obsahují 4 základní prvky a další záměrně přidávané, které zvyšují očkovací účinek [37] :

Vápník Ca – slévárenská ferosilicia udržují rovnováhu mezi vápníkem a hliníkem, pohybující se okolo 1,5 %. Při obsahu hliníku vyšším jak 1,5 % je nebezpečí vzniku „bodlin".

Baryum Ba - očkovadla tohoto typu se používají speciálně v případech, kdy je Vyžadován dlouhý očkovací účinek, například je-li tuhnutí odlitku pomalé z důvodu velké tloušťky stěny odlitku. Celkový obsah Ba v očkovadle nad 3 % je nevhodný, protože zapříčiňuje vývin strusky.

Stroncium Sr - dobře redukuje zákalku, dává požadované množství grafitových kuliček. Jeho pozitivní očkující vliv v tavenině neutralizuje obsah kovů vzácných zemin vyšší jak 1 % .

Zirkon Zr - očkovadla obsahující Zr mají střední schopnost zabraňovat odeznívání očkovacího účinku.Zr může být s výhodou použit v tavenině obsahující vyšší obsah N_2.

Mezi přídavné prvky patří především kovy vzácných zemin, Bi a Mn.

Pro očkování tekutého kovu se ve slévárenství litin požívají tři základní metody :

1. do proudu kovu při přelévání z tavícího agregátu do transportní pánve
2. do proudu kovu při odlévání do slévárenské formy v místě licí jamky
3. ve formě při protékání vtokovou soustavou dostatečně daleko před zářezem do dutiny odlitku

a různé typy forem očkovadel :

1. očkování tekutým očkovadlem (méně známý způsob)
2. očkování granulovaným očkovadlem (nejčastější způsob – vhazování či foukání do proudu kovu plněnými profily)
3. očkování kompaktními tělísky (vkládají se do licí jamky či reakční komůrky ve vtokové soustavě)

2.3 Rozbor tuhnutí litin ve slévárenské pískové formě

2.3.1 Tepelné pochody v soustavě kov – forma

Po nalití taveniny do slévárenské formy dochází v důsledku vedení tepla stěnou formy k nárůstu její teploty a k poklesu teploty kovu až na teplotu tuhnutí, při které se mění tavenina v krystalickou fázi a to od stěny formy směrem k tepelné ose odlitku. Na vlastnostech odlitku se nejvýrazněji projeví charakter (rychlost) krystalizace, která je závislá především na rychlosti odvodu tepla stěnou formy. Tento děj je tedy přímo závislý na tepelně - fyzikálních vlastnostech a konstrukci zkoumané soustavy : slévárenská slitina - forma. [2,18,56,71]

Podmínky pro přestup tepla z kovu do formy se během odlévání, tuhnutí a chladnutí neustále mění. Po odlití formy probíhá po určitou dobu, kdy je kov ještě tekutý, přestup tepla vedením bezprostředním stykem taveniny se stěnami formy. Podmínky přestupu tepla se změní po vytvoření tuhé vrstvy kovu u stěny formy. V důsledku smršťování této tuhé vrstvy vznikne mezera mezi odlitkem a stěnami formy, takže odvod tepla z taveniny do formy se uskutečňuje jednak přes vrstvu tuhého kovu, jednak přes vzniklou mezeru (typické pro kovové formy). Ta je vyplněna plyny, které mají nižší tepelnou vodivost než tuhý kov a forma , v důsledku čehož se sníží intenzita odvodu tepla. Velikost mezery roste v závislosti na pokračujícím smršťování kovu a rozměrech odlitku. Charakter odvodu tepla z odlitku se pak až do jeho úplného vychladnutí nemění.
Během tuhnutí LLG a LKG dochází ke grafitické expanzi, která se navenek projevuje nárůstem objemu odlitku, tzn. že ztuhlý povrch odlitku tlačí po určitou dobu na stěny formy a ke vzniku mezery dochází až po překonání expanze smršťujícími silami chladnoucí ztuhlé fáze odlitku.

Přenos tepla v tavenině je složitější než v látce tuhé, protože teplo se zde sdílí také konvekcí (prouděním) což znamená, že uvažovaný elementární objem se pohybuje.
Při změně teploty v závislosti na čase a zároveň změny způsobené přemístěním elementu z jednoho bodu prostoru do druhého, získáme Fourier – Kirchhoffovu diferenciální rovnici vedení tepla pro tekutý kov :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \nabla^2 \cdot T \qquad (7)$$

v_x, v_y, v_z - jsou rychlosti přemísťování elementu ve směrech os x, y, z .

Při proudění taveniny ve formě vzniká tření, které musíme při řešení průtoku tepla taveninou rovněž uvažovat. Sdílení tepla v tavenině je tedy podmíněno nejen tepelnými, ale také hydromechanickými pochody a k řešení daného problému je zapotřebí celá soustava diferenciálních rovnic.

2.3.2 Přestup tepla z taveniny do formy

Při přestupu tepla z taveniny do stěny formy platí Newtonův vztah :

$$dQ = \alpha \,.\, (T_t - T_f) \,.\, dF \qquad (8)$$

α - součinitel přestupu tepla [$J.m^{-2}.s^{-1}.K^{-1}$]
F - plocha styku kovu s povrchem formy [m^2]
$T_t - T_f$ - rozdíl teplot taveniny a formy [°C]
dQ - udává množství tepla přestupujícího za jednotku času jednotkou povrchu při spádu teploty 1°C mezi povrchovou teplotou kovu a teplotou formy [J]

Převrácená hodnota součinitele přestupu tepla α^{-1} se nazývá tepelným odporem přestupu tepla. Pro výpočet množství přestoupeného tepla Q podle Newtonova vztahu je třeba znát hodnotu součinitele přestupu tepla α, který je závislý na podmínkách přestupu tepla. Ty mohou být určeny z podmínek, které při přestupu nastávají. V povrchové laminární vrstvičce, která se nachází mezi taveninou a formou, přechází teplo pouze vedením . Pro vedení tepla platí Fourierův vztah :

$$dQ = -\lambda \,.\, \frac{\partial T}{\partial n} \,.\, dF \qquad [J.s^{-1}] \qquad (9)$$

λ - součinitel tepelné vodivosti [$J.\, m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$]

$\frac{\partial T}{\partial n}$ - teplotní gradient [$K.m^{-1}$]

Protože oba uvedené vztahy řeší přestup stejného množství tepla a jsou si tudíž rovny, dá se po úpravě vzniklé rovnice napsat vztah :

$$\alpha = \frac{-\lambda}{(T_t - T_f)} \,.\, \frac{\partial T}{\partial n} \qquad [J.m^{-2}.s^{-1}.K^{-1}] \qquad (10)$$

který představuje diferenciální rovnici přestupu tepla z povrchu taveniny na stěnu formy. [2,56]

Intenzitu výměny tepla mezi povrchem formy (odlitku) a okolním prostředím vyjadřuje HAVLÍČEK /18,31/ pomocí Biotova kritéria, které zahrnuje vlivy součinitele přestupu tepla α [$W.m^{-2}.K^{-1}$], tloušťky tělesa x [m] a tepelné vodivosti materiálu tělesa λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]. Biotovo kritérium představuje relativní kritérium intensity tepelné výměny.

$$Bi = \frac{\alpha \,.\, x}{\lambda_f} = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{T_t - T_{f1}} \qquad (11)$$

α - součinitel přestupu tepla z odlitku do formy
x - tloušťka stěny formy
λ_f - tepelná vodivost formy

Hodnoty součinitele přestupu tepla α při různých teplotách povrchu odlitku popsané Havlíčkem jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Důsledkem dilatace tuhnoucího odlitku a prohřívání stěn formy vzniká mezi nimi během tohoto procesu spára (naplněná plynem), která společně s vrstvou oxidů na povrchu odlitku a případnou vrstvou nátěru na formě (kokile, jádru) tvoří mezeru s určitým tepelným odporem. Tím se tepelné podmínky přestupu tepla v průběhu tuhnutí a chladnutí odlitku změní a proto se ukazuje, že důležitou úlohu v podmínkách výměny tepla mezi oběma tělesy tvoří geometrické charakteristiky systému odlitek–mezera–forma. Obdobně jako u kritéria Bi se pro intenzitu výměny tepla mezi odlitkem a formou přes mezeru používá kritérium K, které se liší pouze součinitelem β vyjadřujícím celkový přestup tepla v mezeře.

$$\beta = \frac{\lambda_m}{x_m} \qquad [\ W.m^{-2}.K^{-1}\ ] \qquad (12)$$

Tabulka č. 1 Hodnoty součinitele přestupu tepla při různých teplotách povrchu zkoumaného odlitku [18]

T_p (°C) - teplota povrchu odlitku	součinitel přestupu tepla α [$W.m^{-2}.K^{-1}$]		
	sáláním	dotykem	celkem
100	6,0	5,37	11,37
300	14,4	6,76	21,16
600	39,5	7,03	46,5
900	85,7	6,98	92,7
1000	107,0	6,96	114,0
1200	160,0	6,66	167,0

Odvádění tepla z taveniny formou je *nestacionární tepelný děj* a proto se teplota jednotlivých bodů soustavy odlitek – forma s časem mění. Během těchto tepelných pochodů se vždy mění tepelný obsah tělesa. Rychlost tepelné změny je přímo úměrná tepelné vodivosti tělesa λ a nepřímo úměrná jeho akumulační schopnosti $c.\rho$.
Rychlost tepelného děje je při nestacionárním průtoku tepla závislá na jeho teplotní vodivosti *a* :

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \qquad (13)$$

a – součinitel teplotní vodivosti [$m^2.s^{-1}$]
λ - součinitel tepelné vodivosti [$J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$]
c - měrné teplo [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
ρ - měrná hmotnost [$kg \cdot m^{-3}$]

Součinitel teplotní vodivosti *a* je pro výpočty nestacionárních dějů stejně významný jako součinitel tepelné vodivosti λ při dějích stacionárních.
Průtok tepla tuhým kovem a formou pro trojrozměrné teplotní pole řeší Fourierova diferenciální rovnice :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot T + \frac{L}{c \cdot \rho} \qquad (14)$$

. - množství tepla vzniklého zdrojem tepla, nebo pohlceného za jednotku času v jednotce objemu
∇^2 – Laplaceův operátor
: - čas [s]
T - teplota [°C]

Pro vedení tepla ve stěně formy se z Fourierovy diferenciální rovnice odvozuje Fo kritérium, které vyjadřuje závislost teplotní vodivosti a ($m_2.h^{-1}$), doby τ (h) a tloušťky tělesa x (m) [18,31] :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (15)$$

úpravou dostaneme :

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{X^2} \qquad (16)$$

τ - čas od zaplnění dutiny formy kovem (hod)
X - vzdálenost sledovaného místa ve formě od vnitřního povrchu formy (m)

K analytickému výpočtu šíření tepla stěnou formy náleží tepelné kritérium parametrického typu, tedy poměr teploty ve sledovaném místě T_x k teplotě počáteční T_o. Úlohu pro isotropní materiály, kde je přenos tepla určen především tepelnou vodivostí a jehož tepelně fyzikální veličiny se nemění s teplotou, lze řešit pomocí Gaussova integrálu chyb.

$$T_x = T_p - (T_p - T_o) \operatorname{erf} \left(\frac{X_b}{2 \sqrt{a.\tau}} \right) \qquad (17)$$

X_b - vzdálenost sledovaného bodu od vnitřního povrchu formy (m)
T_x - teplota ve sledovaném místě ve vzdálenosti x od vnitřního povrchu formy (°C)
T_o - počáteční teplota formy (°C)
T_p - teplota vnitřního povrchu formy (°C)

Pro výpočet teplotních polí v pískových formách, ve kterých se prostup tepla uskutečňuje kromě kondukcí také konvekcí i sáláním a hlavní veličiny λ, c a b_f se mění s teplotou, byla VEJNIKEM a ANIŠOVIČEM [18] vyvinuta metoda, podle níž je teplotní pole ve formě vyjádřeno parabolickou závislostí. Z této podmínky vychází jeden ze způsobů stanovení veličiny tepelné akumulace formy b_f.
Teplota v libovolném místě formy se stanoví ze vztahu :

$$T_x = (T_f - T_o) . \left(1 - \frac{X_b}{X} \right)^{n_2} + T_o \qquad (18)$$

T_f - teplota vnitřního ohřívaného povrchu formy (°C)
x - tloušťka stěny formy (m)
n_2 - stupeň paraboly

2.3.3 Průběh tuhnutí a chladnutí kovu ve slévárenské formě

Tuhnutí kovu ve slévárenské formě je komplikovaný proces, který předurčuje kvalitu homogenity odlitku. [2] Pod pojmem tuhnutí kovu rozumíme vznik tuhé souvislé vrstvy a její postup směrem k tepelné ose odlitku, při současném úbytku tekuté fáze. Průběh tuhnutí taveniny je předurčen :

1. charakterem slitiny - fyzikální vlastnosti slitiny závislé na chemickém složení, teplotě přehřátí, měrné hmotnosti...
   - tvorba zárodků, průběh krystalizace ...
2. kvalitou formy - fyzikální vlastnostmi formy, které jsou závislé na použitém pojivu a ostřivu a dalších vlastnostech: pevnost, prodyšnost, vlhkost, spěchovatelnost ...
3. konstrukcí odlitku – síla stěn, křížení stěn (tepelné uzle), technologické nálitky, velikost a hmotnost odlitku, způsob zavtokování, nálitkování..

Tuhnutí taveniny nezačíná v okamžiku nalití kovu do formy, ale až po jejím ochlazení z licí teploty na teplotu likvidu. Tento časový úsek je závislý na množství tepla akumulovaného v tavenině a tepelně fyzikálních vlastnostech formy. Tepelně fyzikální vlastnosti odlitku a formy se vyjadřují součinitelem tepelné akumulace - b_o , b_f :

$$b_f = \sqrt{\lambda_f \cdot c_f \cdot \rho_f} = \frac{\lambda_f}{\sqrt{a_f}} \quad [\, W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1} \,] \qquad (19)$$

K získání konkrétních hodnot součinitele tepelné akumulace pro různé slévárenské materiály se často používá VEJNIKOVA metoda měření teplotních polí ve slévárenské formě, která vychází z nahrazení průběhu teplot od líce formy známou funkcí – parabolou, či sinusovkou. Tato metoda našla své uplatnění především při hodnocení pískových forem, kde uvažuje teplotu na líci formy v okamžiku ztuhnutí odlitku blízkou teplotě krystalizace odlévaného kovu a neuplatňuje jeho přehřátí. To při odlévání do pískových forem podstatně ovlivňuje dobu tuhnutí odlitku, jak uvádí HAVLÍČEK [18], pro vlastní výpočet však tuto počáteční podmínku lze eliminovat. Pro stanovení b_f u kovových forem použila NÉMETHOVÁ [19] uvedenou metodu rozšířenou o poznatky ANIŠOVIČE, týkající se hodnoty teploty na rozhraní kov – kokila.
Tato hodnota činí (0,5 - 0,7). T_{kr} a lze ji odvodit z poměru tepelné akumulace formy a tepelné akumulace odlitku (b_f / b_o). V těchto experimentech je teplota rozhraní uvažována jako konstantní po celou dobu tuhnutí odlitku. Konkrétní hodnoty některých slévárenských materiálů jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Během ochlazování taveniny ve slévárenské formě vzniká, jak v kovu, tak i ve stěně formy tzv. teplotní gradient. Ten má pro tuhnutí a vnitřní jakost odlitku velký význam v podobě šířky dvoufázového pásma a s ním související charakter primární krystalizace, dendritické a pásmové odmíšení , mikroporezity atd. V momentě, kdy teplota taveniny u líce formy klesne pod teplotu likvidu, začíná v této oblasti krystalizace charakteristická růstem dendritů. V případě slitiny tuhnoucí v intervalu teplot koexistují v oblasti tuhnutí dvě fáze – tekutá i tuhá. Souvislá tuhá fáze zde vzniká v okamžiku, kdy teplota taveniny klesne pod teplotu solidu. Od tohoto okamžiku jsou pak v odlitku vedle sebe tři pásma :

a) pásmo tuhé kovové vrstvy, jehož tloušťka se s časem zvětšuje
b) dvoufázové pásmo tvořené ztuhlým kovem (dendrity) a taveninou, jehož šířka je závislá na intervalu tuhnutí a teplotním gradientu
c) pásmo taveniny, které se v průběhu tuhnutí zmenšuje a v poslední fázi se soustředí do míst tepelných uzlů

V současné době jsou účinným nástrojem pro řešení tuhnutí litinových odlitků v pískových formách simulační programy, např. SIMTEC, PROCAST, MAGMA [29,30,71] a jiné. Ty využívají řešení fyzikálně – tepelných procesů pomoc Fourierovy diferenciální rovnice sdílení tepla při využití numerických metod konečných prvků a konečných diferencí. Používané programy, které se neustále rozvíjejí a zdokonalují, jsou schopny zjistit : způsob plnění formy tekutým kovem, tuhnutí a ochlazování kovu ve formě atd. Ze získaných výsledků dokáží zobrazit také předpokládaný výskyt skrytých vad v odlitcích v 3D vyobrazení, % feritu, pnutí v odlitcích atd.

Tabulka č. 2 Hodnoty součinitele tepelné akumulace uvedených slévárenských formovacích materiálů dle autorů [5,17,19,68]. Někteří autoři bližší informace o prováděných experimentech neuvádějí.

Materiál	Teplota [°C]	bf [$W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$]
Šamotová směs	20 až 1500	2 100 až 2 450
Ocel uhlíková	100 až 1500	12 784 až 14 518
Litina (3%C)	*100 až 1500*	*13 400 až 14 518*
Litinová kokila (tavenina Al)	18 až 200	7 642 až 12 223
Litinová kokila (tavenina LLG)	20	7 372
Písková forma (tavenina Al)	18 až 20	1 135 až 1 445
JBFS (3,5 – 4,5 %vody)	-	1 520
CT směs pojená	-	1 270
Sušená směs	-	*1 030*
Bentonitová směs	-	1 320
CT – SiO2	-	1 670
Kokila (LLG)	-	5 670

2.4 Kinetika tuhnutí a její vliv na homogenitu odlitků

2.4.1 Smršťování slitin do ztuhnutí odlitku

Jedná se o komplikovaný děj změn objemu slitiny , který je závislý na fyzikálních a fyzikálně chemických vlastnostech slitiny a formy při vzájemném působení, v jednotlivých fázích přeměn (ochlazování taveniny, krystalizace jednotlivých fází a smršťování pevné fáze během intervalu tuhnutí) od nalití taveniny až po ztuhnutí odlitku.

2.4.1.1 Smršťování slitin v tekutém stavu

Smršťování tekutého kovu nastává ihned po nalití do dutiny formy vlivem odvodu tepla z přehřátého kovu okolními stěnami do vnějšího prostředí. [2] Tento děj je popsán rovnicí, v níž je smrštění přímo úměrné výši přehřátí :

$$\varepsilon_{VL} = \alpha_{VL} . (T_t - T_s) . 100 \quad [\%] \qquad (20)$$

ε_{VL} – objemové smrštění v tekutém stavu [%]
α_{VL} – součinitel objemového smrštění v tekutém stavu [$°C^{-1}$]
T_t, T_s - teplota taveniny při plnění formy, teplota solidu [°C]

Toto objemové smršťování ochlazované taveniny probíhá nejen do teploty likvidu, ale i v intervalu teplot tuhnutí slitin likvidu – solidu v souladu s úbytkem fáze tekuté vůči fázi tuhé.
To znamená, že při vyhodnocování dilatačních změn v tomto teplotním intervalu musíme v rámci prováděného experimentu brát v úvahu všechny druhy objemových změn. Vedle smršťování zbylé tekuté fáze tu vznikají objemové změny v důsledku krystalizace jednotlivých fází z taveniny (někdy i kladné, např při krystalizaci uhlíku - grafitická expanze) a zároveň i změny při smršťování těchto krystalů s poklesem teploty.
Objemové změny při ochlazování taveniny sledovali SEAGER a ASCH [2], kteří došli k závěru, že objem roztavené litiny se zmenšuje stále o 1,1 % při poklesu teploty o 100 °C bez zásadního vlivu chemického složení litiny.
BRIGGS a GEZELIUS [2] sledovali obdobné děje u roztavené oceli s 0,3 % C s výsledky smrštění asi 1,6 % při poklesu teploty o 100 °C.

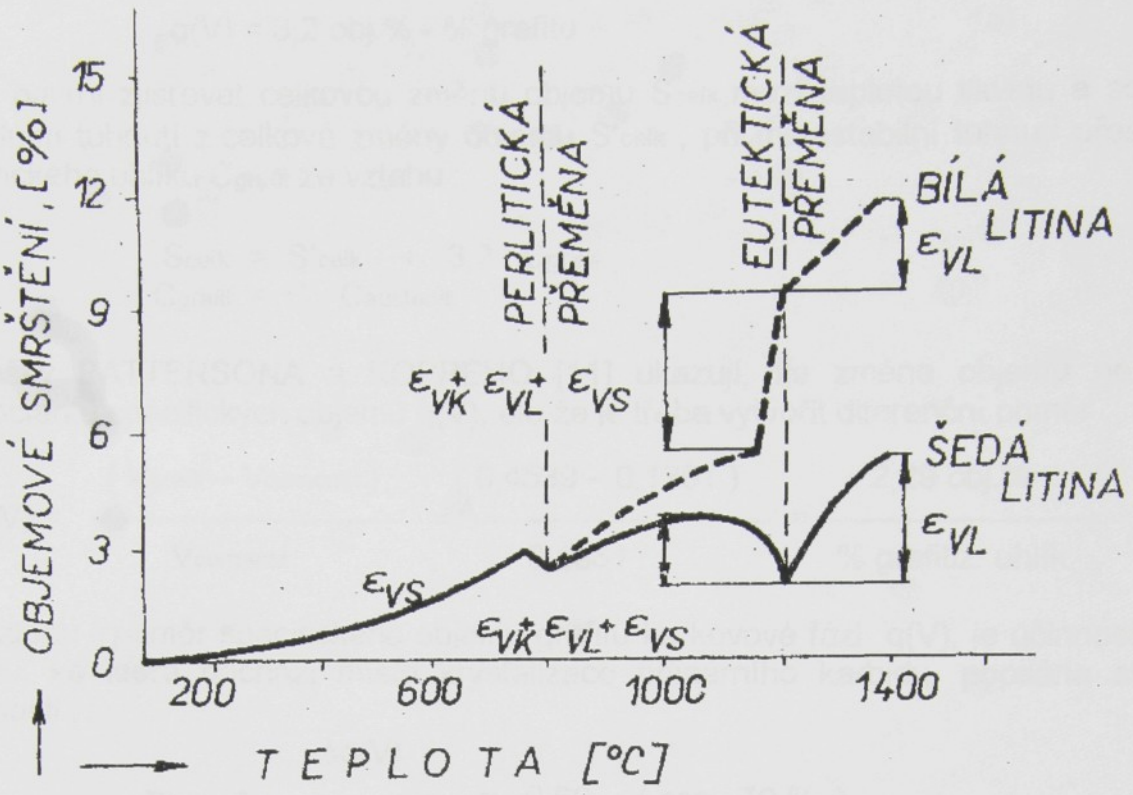
2.4.1.2 Smršťování slitin v intervalu tuhnutí

Jak bylo popsáno výše, jedná se o komplexní děj, jehož dilatační průběh je u litiny závislý na vylučování několika tuhých fází spolu se smršťováním ubývající taveniny. [2]
Na základě teoretických úvah o elementární stavbě taveniny (dírová teorie, teorie rojů) má většina ztuhlých krystalických fází při téže teplotě menší objem. Opačný efekt je znám především při krystalizaci grafitu – grafitická expanze. Jestliže srovnáme dilatační změny při tuhnutí bílé a šedé litiny o stejném chemickém složení, obrázek č.13, je zřejmé, že výsledný rozdíl je závislý především na podmínkách odvodu tepla z taveniny během tuhnutí.

Během prvních okamžiků tuhnutí bílé litiny se vylučují dendrity austenitu do taveniny a po této primární krystalizaci probíhá krystalizace zbylé taveniny na ledeburit. Tento průběh vykazuje stejnou tendenci smršťování jako při tuhnutí oceli. Rozdíl při tuhnutí šedé litiny je patrný po primární krystalizaci austenitu po níž se tvoří grafitové eutektikum, kterého přibývá se zvyšujícím se obsahem uhlíku spolu s následným zvětšováním objemu odlitku. Tento rozdíl ve smršťování je možné sledovat v oblasti eutektické krystalizace, kde se bílá litina výrazně smršťuje a naopak šedá litina narůstá vlivem většího měrného objemu grafitu. Smrštění jednotlivých slévárenských kovů a slitin během tuhnutí je k porovnání v tabulce č. 3, objemové smrštění litin při různém obsahu %C v tabulce č. 4. [2]

Tab. č.3 Smrštění slévárenských kovů a slitin v intervalu teplot tuhnutí [2]

Slitina	objemové smrštění %
Ocel (0,5%C)	2,5 až 3,0 (+)
Ocel (1,0%C)	4,0 (+)
Bílá litina	4,0 až 4,5 (+)
Šedá litina	expanze 2,5 (-)
Měď	4,9 (+)
Hliník	6,6 (+)
Silumin AlSi 12	3,8 (+)



Obr. č. 13 Srovnání objemového smrštění bílé a šedé litiny [2]

Tab. č. 4 Objemové smrštění litinových odlitků (bez přehřátí až po konec krystal.)

Obsah uhlíku %	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Smrštění bílé litiny %	5,1	4,6	4,2	3,7	3,3
Smrštění šedé litiny %	4,3	2,8	1,4	0,1	-1,5

Problematikou tuhnutí litinových odlitků v intervalu tuhnutí se nejnověji zabýval HAMPL [53,73]. Určoval objemové změny grafitických litin na základě analýzy křivek ochlazování vzorku taveniny. Studiem možnosti odlévání bez vtoku v dělící rovině se zabýval KRUTZER [11]. Princip metody spočívá v tom, že může být do jisté míry odstraněno smršťování objemu během tuhnutí kovové fáze austenitu expanzí nekovové fáze grafitu. Grafit má více jak trojnásobně vyšší specifický objem než cementit či austenit a může tak vyrovnávat deficit objemu při smršťování kovové fáze. Objemy příslušných fází za určitých podmínek :

V_{grafit} = 0,4475 cm^3/g při T 20°C = 0,4539 cm^3/g při T_{solidu}

$V_{cementit}$ = 0,1303 cm^3/g při T 20°C = 0,1381 cm^3/g při T_{solidu}

$V_{austenit}$ = 0,1360 cm^3/g při tavení bez křemíku

Z uvedených objemů se dají vypočítat poměry specifických objemů grafitu ke kovové fázi

$$q(V) \geq 3,1 \text{ až } 3,3$$

Z uvedeného vztahu se často mylně usuzuje, že 1% eutektického grafitu znamená změnu objemu 3,1% místo odpovídajících 2,8 až 2,9%. WLODAWER /11/ stanovil, že při kompletně eutektickém tuhnutí s 2,25 % grafitického uhlíku odpovídá změna objemu 7,2 % podle faktoru vytěsňování :

$$q(V) = 3{,}2 \text{ obj.\% - \% grafitu} \qquad (21)$$

Dále navrhl zjišťovat celkovou změnu objemu S_{celk} mezi teplotou likvidu a solidu při stabilním tuhnutí z celkové změny objemu S'_{celk}, při metastabilní tuhnutí přes obsah grafitického uhlíku C_{grafit} ze vztahu :

$$S_{celk} = S'_{celk} + 3{,}2 \,.\, C_{grafit} \qquad (22)$$

$$C_{grafit} = C - C_{austenit} \qquad (23)$$

Zkoušky PATTERSONA a KOPPEHO [11] ukazují, že změna objemu nevyplývá z kvocientu specifických objemů q(V), ale že je třeba vytvořit diferenční poměr

$$\Delta q(V) = \frac{(V_{grafit} - V_{cementit})}{V_{cementit}} = \frac{(0{,}4539 - 0{,}1381)}{0{,}1381} = \frac{2{,}29 \text{ obj.\%}}{\text{\% grafitiz. uhlík}} \qquad (24)$$

Ve vztahu - poměr specifického objemu grafitu ke kovové fázi q(V), je účinnost tvorby grafitu, ke které dochází místo krystalizace primárního karbidu, popsána stupněm účinnosti :

$$\eta_{lunk} = \frac{\Delta q(V)}{q(V)} = 0{,}69 \quad (\text{cca } 70\ \%) \qquad (25)$$

Podobně se tvořila při vylučování podílu grafitu z austenitické základní hmoty smíšená struktura se specifickým objemem :

$$\Delta V_{směs} = x \,.\, V_{grafit} + (1 - x) \,.\, V_{austenit}$$
$$= V_{austenit} + x \,.\, (V_{grafit} - V_{austenit}) \qquad (26)$$

z toho vyplývá nárůst specifického objemu

$$\Delta V_{směs} = x \,.\, (V_{grafit} - V_{austenit}) \qquad (27)$$

který představuje míru účinnosti expanze grafitu. Nárůst objemu expandující fáze S_{exp} v % je dán poměrem :

$$S_{exp} = \frac{\Delta V_{směs}}{V_{austenit}} \,.\, 100 \quad [\%] \qquad (28)$$

Nahradíme-li podíl grafitu obsahem grafitizujícího uhlíku C_{grafit} spolu s

$$X = \frac{C_{grafit}}{100} \quad \text{je potom} \qquad (29)$$

$$S_{exp} = C_{grafit} \,.\, \frac{(V_{grafit} - V_{austenit})}{V_{austenit}} \quad [\%] \qquad (30)$$

Tyto poměry je třeba brát v úvahu při srovnávání různých modelů smršťování. Specifický objem austenitu narůstá se vzrůstajícím obsahem křemíku. Schématické

znázornění průběhu smršťování šedé litiny ČSN 42 2425 (GG 25) na obrázku č. 14 odvozuje souvislost mezi metalurgií a technologií lití. Zde je zobrazen pokles specifického objemu s klesající teplotou během tuhnutí. V tekuté fázi specifický objem stále klesá. V intervalu tuhnutí dochází při ochlazování kovové fáze k silnému smrštění. Tato kontrakce může být nejen odstraněna, ale i vykompenzována expanzí grafitu, který se vylučuje při tuhnutí eutektika. Tím je možné vyrovnávat část smrštění v tekutém stavu a určit vyrovnávací teplotu T'_{GSt} , která je označena jako „teplota vyrovnávající smršťování v odlitku".

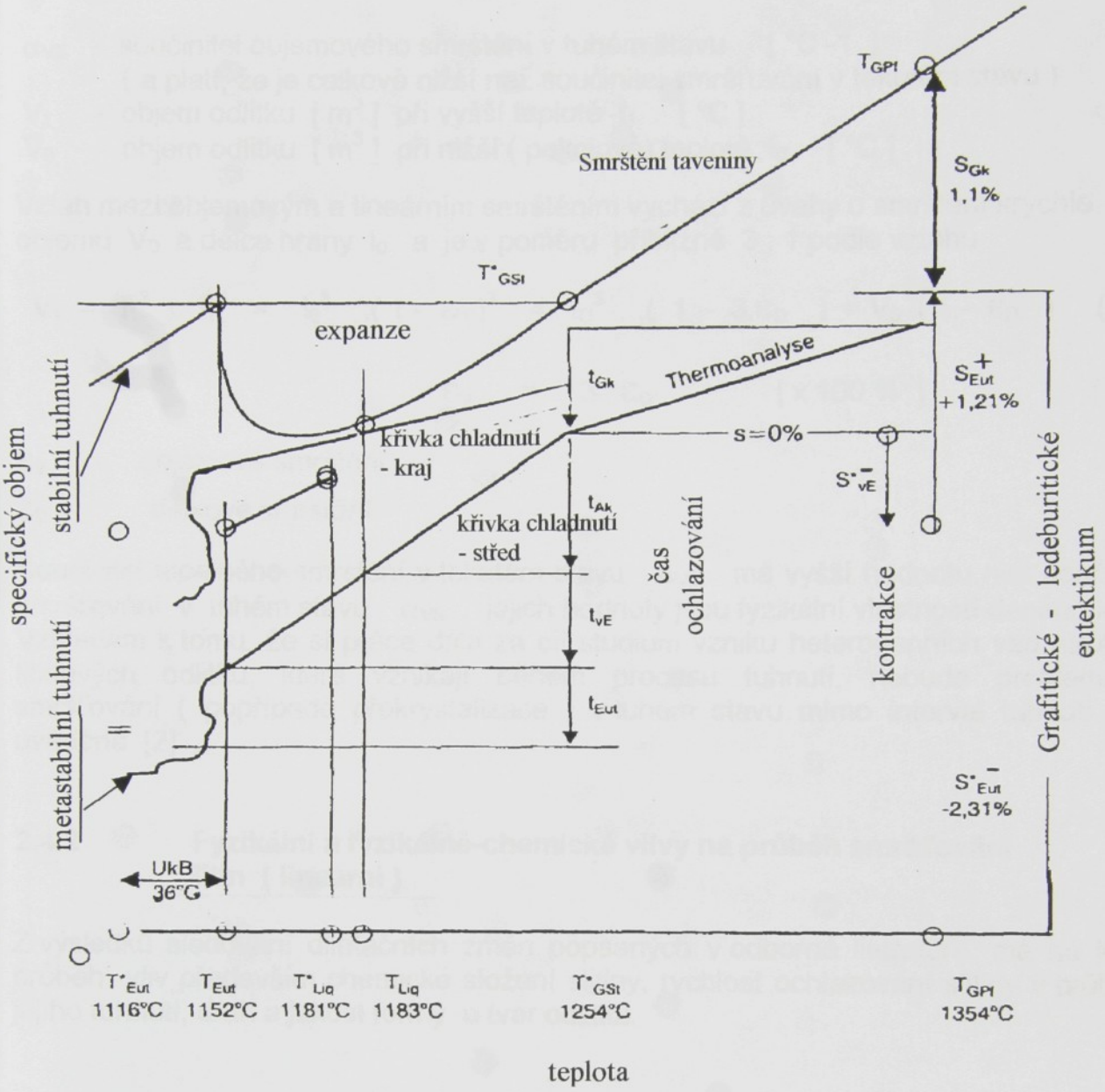
Cíleným nastavením licí teploty v pánvi T_{GPt} a doby ochlazování při odlévání do formy během lití t_{GK} jsou dány teoretické - technické podmínky odlévání bez vtoku v dělící rovině a může být i vodítkem k odstranění vnitřních vad odlitků obecně. Vylučování grafitu začíná při dosažení eutektické teploty (okolo 1152 °C), na obrázku č. 14 má být proto úsečka mezi teplotami T_{Eut} a T'_{Liq} pokládána za rozmezí teplot tuhnutí centra odlitku. Dříve tuhnoucí partie odlitku dosahují z důvodu nestacionárního přechodu tepla eutektické teploty v čase, ve kterém jsou v centru odlitku stále ještě vyšší teploty. Účinná expanze grafitu proto může začít již v době, kdy v tepelném centru ještě není dosaženo eutektické teploty.

Samonasycení odlitku se znázorňuje jako proces posuvu, při kterém je zbytek taveniny posouván z oblastí s eutektickou teplotou do partií, které ještě eutekticky nereagují. Tento postup je pokryt vylučováním grafitu v oblastech konstitučního podchlazení, které přispívá ke značným segregacím a tepelně podmíněným a tíhové síle podléhajícím deformacím povrchu licí formy. K objasnění jsou v obrázku č. 14 schématicky zaneseny křivky pro okraj a střed odlitku. Na okraji odlitku je již po průběhu procesu lití dosaženo teploty likvidu.

Změna celkového objemu se dělí na předběžné tuhnutí se smršťováním primární fáze a na změnu objemu při eutektické reakci, přičemž se rozlišuje mezi stabilním a metastabilním tuhnutím. Stabilní tuhnutí vytváří pozitivní změnu objemu, metastabilní další smršťování. Eutektická expanze grafitu na jedné straně a smršťování ledeburitu na straně druhé jsou ve vzájemném vztahu, jak již bylo možné odvodit z rovnice diferenčního poměru $\Delta q(V)$.

Objemové deficity jsou počítány ze specifických objemů. Nové zkoušky [11] specifického objemu litiny umožňují srovnání s molekulárními teoretickými úvahami k určování specifického objemu z mřížkových konstant (parametrů) austenitu a porovnání změny objemu v celém intervalu tuhnutí s teorií tuhnutí zbytku taveniny. Přitom je nutné si povšimnout, že je při metastabilním tuhnutí teplota likvidu a i eutektická teplota nižší než při stabilním tuhnutí. Na jedné straně je tím vyvozena možnost techniky lití s podchlazenou taveninou, která ovlivní charakter smršťování zejména u nadeutektických litin. Na straně druhé vytváří technika lití s podchlazenou taveninou měřítko pro posouzení stavu zárodků, jako diference eutektických teplot při stabilním a metastabilním tuhnutí, je-li tepelnou analýzou stanovena spodní eutektická teplota.

Ve schématické termoanalýze na obrázku č.14 je naznačena tato oblast podchlazení. Stupeň podchlazení je určen jako kritérium ztuhnutí litiny s vyloučením grafitu, k jehož posuzování se vztahují i četné práce dalších autorů. [11]



Obr. č. 14 Schématické znázornění průběhu smršťování u šedé litiny [11] ČSN 42 2425 (GG 25), C = 3,5%, Si = 1,5%, Mn = 0,65%, P = 0,1%, S = 0,08%, eutektický stupeň sycení Sc = 0,934 , stupeň grafitizace K = 1,17 a podíl dendritů činí 13 %.

Symboly : T_{xx} = teplota, t_{xx} = čas, S_{xx} = smrštění, UkB = oblast podchlazení.
Indexy : vE = předběžné tuhnutí, GK = ochlazování během lití, Pf = pánev, Eut = eutektikum, Ak = ochlazování, St = kus, Liq = likvidus, T'_{GSt} = licí teplota vyrovnávající smrštění, T_{GPt} = cílená teplota v pánvi

2.4.1.3 Smršťování slitin v tuhém stavu v intervalu tuhnutí

Smršťování kovů a slitin v tuhém stavu je přímo úměrné jejich teplotě. [2] Obecně lze objemové smrštění v tuhém stavu vyjádřit vztahem :

$$\varepsilon_{VS} = \alpha_{VS} \cdot (t_1 - t_0) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \quad [\times 100\ \%] \qquad (31)$$

α_{VS} - součinitel objemového smrštění v tuhém stavu [°C -1]
(a platí, že je celkově nižší než součinitel smršťování v tekutém stavu)
V_1 - objem odlitku [m^3] při vyšší teplotě t_1 [°C]
V_0 - objem odlitku [m^3] při nižší (pokojové) teplotě t_0 [°C]

Vztah mezi objemovým a lineárním smrštěním vychází z úvahy o smrštění krychle objemu V_0 a délce hrany l_0 a je v poměru přibližně 3 : 1 podle vztahu

$$V_1 = l_1^3 \times l_1^3 = l_0^3 .(1 - \varepsilon_0)^3 = l_0^3 .(1 - 3.\varepsilon_D) = V_0 .(1 - \varepsilon_D) \quad (32)$$

$$\varepsilon_V = 3 . \varepsilon_D \quad [x 100 \%] \quad (33)$$

ε_V - objemové smrštění

ε_D - délkové smrštění

Součinitel tepelného smrštění v tekutém stavu α_{VL} má vyšší hodnotu než součinitel smršťování v tuhém stavu α_{VS} , jejich hodnoty jsou fyzikální vlastností daného kovu. Vzhledem k tomu, že si práce dala za cíl studium vzniku heterogenních vad struktury litinových odlitků, které vznikají během procesu tuhnutí, nebude problematika smršťování (popřípadě překrystalizace) v tuhém stavu mimo interval tuhnutí dále uváděna. [2]

2.4.2 Fyzikální a fyzikálně-chemické vlivy na průběh smršťování litin (lineární)

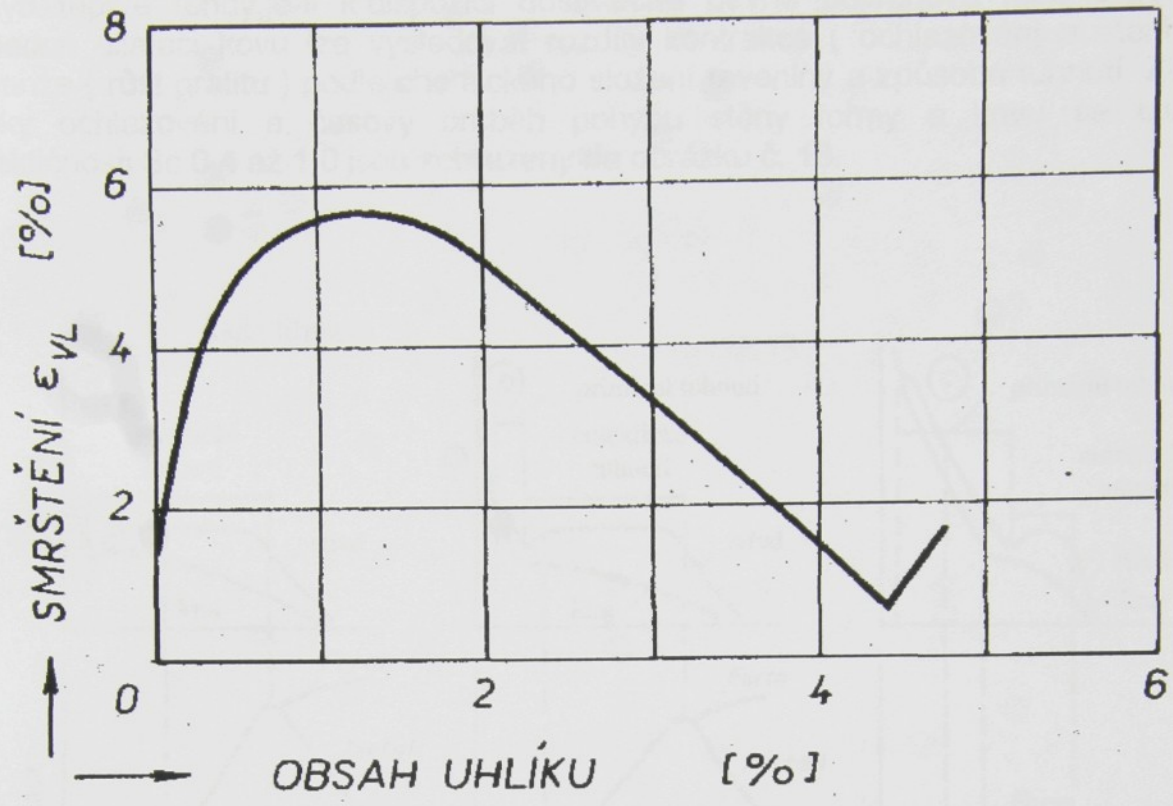
Z výsledků sledování dilatačních změn popsaných v odborné literatuře, má na jejich průběh vliv především chemické složení slitiny, rychlost ochlazování slitiny v průběhu jejího tuhnutí, druh a jakost formy a tvar odlitku.

2.4.2.1 Vliv chemického složení taveniny

U litin požívaných ve slévárenství mají na dilatační změny značný vliv prvky, které rozdělujeme do dvou skupin:
1. Podporující grafitizaci (grafitizační) : Al, C, Si,Ti, Ni, Cu, P
2. Brzdící grafitizaci (karbidotvorné) : B, Ce, Mg, Te, V, Cr, S, Mo, Mn, W, Nb

Smrštění litiny je tím menší, čím více obsahuje prvky podporující grafitizaci. Jedním z nejvýraznějších prvků je sám uhlík C, jehož vliv na smrštění v tekutém stavu není lineární, ale má při daném obsahu ve slitině své maximum (cca 1,2 %) a minimum (cca 4,3 %) viz obrázek č. 15.

Pokud budeme srovnávat smrštění dvou litin o stejném celkovém obsahu uhlíku, pak se více smršťuje ta litina, která má méně vyloučeného uhlíku v podobě grafitu, to znamená, že se tu uplatňuje vliv rychlosti ochlazování. Ke stejným závěrům dospěl i WALTONA [5]. Pro velikost staženiny je podle WITTMOSERA [5] rozhodující pouze množství grafitického uhlíku vyloučeného za eutektické reakce , jehož množství je dáno rovnovážným stavem Fe – C a rozpustností v tavenině , kterou snižuje nejvíce Si a P. Tito autoři odvodili teoretický vztah pro množství uhlíku vyloučeného ve formě grafitu v závislosti na množství C, Si a P při stabilním tuhnutí :



Obr. č. 15 Vliv % C na velikost objemového smrštění v tekuté fázi [2]

$$EGM = C_{celk.} - 1{,}3 + 0{,}1.(Si + P) \quad \text{pro podeutektoidní LLG} \qquad (34)$$

$$EGM = 2{,}9 - 0{,}22\,.\,(Si + P) \quad \text{pro nadeutektoidní LLG} \qquad (35)$$

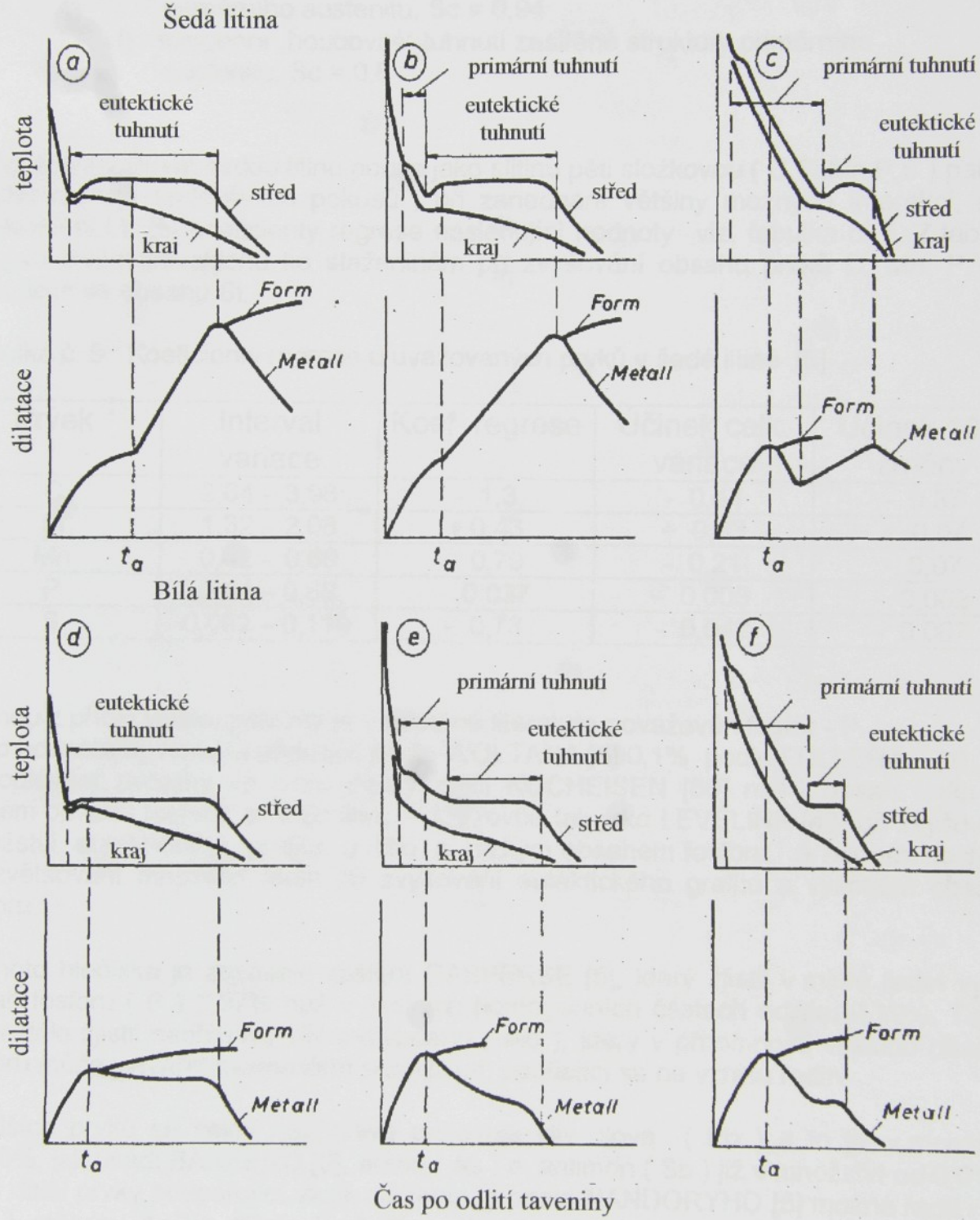
K obdobným závěrům dospěl HILLER [5], a to, že staženiny vzrůstají s klesajícím stupněm eutektičnosti a klesajícím poměrem C / Si, a potvrzuje příznivý vliv obsahu C oproti nepříznivému vlivu Si na snížení staženin. WALLACE [5] dospěl k hodnotě 3,9 ze vztahu :

$$C\,\% + \frac{Si\,\%}{7} = 3{,}9 \qquad (36)$$

pro úplné potlačení staženin. Při překročení této hodnoty se u jeho zkušebních těles vlivem zvětšení objemu při grafitizaci staženiny neobjevovaly.

Poměrem C / Si , vzhledem ke vzniku vad homogenity podeutektických litinových odlitků, se zabýval EXNER [28], který vysledoval jejich nejmenší výskyt u sériové výroby bloků motoru LIAZ (330 kg) při poměru okolo hodnoty 1,75. O poměru C / Si se zmiňuje i ROUČKA [38], který uvádí, že čím nižší je hodnota poměru (nižší uhlík, vyšší křemík), tím dokonalejší je grafitizace, což znamená menší sklon k zákalce a větší podíl feritu ve struktuře. Uvedený doporučený poměr je okolo 1,8.
Příznivý vliv zvýšení obsahu Mn na kompenzaci vlivu přísady Si (FeSi75), v rámci dosažení CE (Sc) při druhování nízkouhlíkatých litin, uvádí ve své práci FULLER [5]. Studiem vlivu stupně eutektičnosti Sc na množství staženin a ředin se zabýval CZIKEL [34], který zjistil jejich nejmenší množství při Sc odpovídající hodnotě 1,0. Při překročení či nedosažení této hodnoty množství vad stoupá.
Vliv chemického složení na průběh kontrakce a expanze tuhnoucího odlitku v pískové formě na příkladu šedé a bílé litiny studoval BOENISCH [15]. Pokud je kov tekutý nebo jen částečně ztuhlý, ale pohyblivý, stále sleduje zcela pohyby formy. Kov provádí vlastní

pohyb teprve tehdy,je-li k dispozici dostatečně pevná povrchová kůra odlitku. Ve výsledné dilataci kovu lze vysledovat rozdíly kontrakce (ochlazování austenitu) a expanze (růst grafitu) podle chemického složení taveniny a způsobu tuhnutí. Získané křivky ochlazování a časový průběh pohybu stěny formy a kovu se stupněm eutektičnosti Sc 0,4 až 1,0 jsou zobrazeny na obrázku č. 16.



Obr. č. 16 Křivky ochlazování a časový průběh pohybu stěny formy a kovu u litiny s Sc 0,4 až 1,0 [15]

Šedá litina : a) endogenní tuhnutí eutektické taveniny, Sc = 1,0
b) endogenní tuhnutí eutektické taveniny s přítomnosti primárního austenitu, Sc = 0,94
c) exogenní „houbovité" tuhnutí zasítěné struktury primárního austenitu, Sc = 0,4

Bílá litina : d) exogenní tuhnutí eutektické taveniny, Sc = 1,0
e) exogenní tuhnutí eutektické taveniny za přítomnosti primárního austenitu, Sc = 0,94
f) exogenní „houbovité" tuhnutí zasítěné struktury primárního austenitu, Sc = 0,6

Budeme-li uvažovat šedou litinu pouze jako slitinu pěti složkovou (C,Si,Mn,P,S) pak při použití metody faktorálních pokusů , při zanedbání většiny možných interakcí, mají podle KRALLE [5] koeficienty regrese následující hodnoty viz. tabulka č. 5. Z tabulky vyplývá snižování sklonu ke staženinám při zvyšování obsahu prvků C, Mn, P, S a snižujícím se obsahu Si.

Tabulka č. 5 Koeficienty regrese u uvažovaných prvků v šedé litině [5]

Prvek	Interval variace	Koef. regrese	Účinek celk. variace	Účinek 10% změny
C	2,64 – 3,98	- 1,3	- 0,44	- 0,37
Si	1,32 – 2,08	+ 0,43	+ 0,33	+ 0,07
Mn	0,42 - 0,69	- 0,79	- 0,21	- 0,07
P	0,44 – 0,69	- 0,037	- 0,009	- 0,002
S	0,062 – 0,119	- 0,73	- 0,042	- 0,007

Jednou z příčin vzniku porezity je v odborné literatuře považován fosfor - P.
Jeho hodnota by neměla překročit podle WOLTANA [5] 0,1% podle FULLERA [5] 0,2%. Při odlévání zkoušky ve tvaru desky zjistil KOCHEISEN [60] nízký obsah ředin při nízkém obsahu fosforu a s Sc litiny = 1. Zrovna tak jako LEVELINK [43] při zvyšování množství eutektického grafitu u litin s nízkým obsahem fosforu. A naopak dochází ke zvětšování množství ředin při zvyšování eutektického grafitu a vysokém obsahu fosforu.

Z tohoto hlediska je zajímavé zjištění CASPERSE [5], který zjistil v místě ředin vyšší obsah fosforu (P) 0,37% než v okolních homogenních částech odlitku 0,19%. Tento autor dále zjistil nepříznivý vliv molybdenu (Mo), který v přítomnosti vyššího obsahu fosforu může vytvářet kvaternární eutektikum podílející se na vzniku ředin.

Z dalších prvků se velmi nepříznivě projevuje vliv olova (Pb) a to již v množství 0,005%, jak uvádí BAREERO [5], arsen (As) a antimon (Sb) již v množství od 0,01%. Mezi další prvky podporující vznik staženin je podle NANDORYHO [5] možné řadit i cín (Sn), stříbro (Ag) a měď (Cu). Naopak prospěšný vliv těchto prvků stabilizujících perlit (Sb, Sn, Cu) u nadeutektických litin zjistil UNGERMAN [61].
Vliv hořčíku - Mg na vznik staženin u LGG studoval HUMMER [9]. Protože se uvedený vliv uplatňuje především v souvislostech s výrobou LGG (obsah Mg v modifikátoru), jsou získané výsledky uvedeny v kapitole 2.4.2.3 b).

Mezi další chemické prvky, které mohou působit negativním účinkem na vznik porezity, patří i prvky plynné. Plyny rozpuštěné v tavenině se během tuhnutí soustřeďují spolu s taveninou do míst posledního tuhnutí tj. do ředin a staženin , či jsou chemicky vázané jako oxidy, hydridy a nitridy a vzhledem ke své vysoké teplotě tání mohou tvořit krystalické zárodky dané slitiny nebo shluky vzhledem ke svému množství.
Rozpustnost plynů ve slitinách železa s uhlíkem Fe-C je při nízkých teplotách malá a skokem narůstá při přechodu do tekutého stavu, kde s teplotou taveniny vzrůstá. Jedná se především o dusík (N_2) , kyslík (O_2) a vodík (H_2).

Z uvedených prvků přichází v úvahu především dusík - N_2, který je ale v případě přítomnosti nitridotvorných prvků, jako je titan (Ti), vanad (V), chrom (Cr) a bór (B), v litině pevně vázán. ŠLAHORA [20] zjistil jeho obsah v tavenině v indukční peci v rozmezí 0,0039 až 0,0064 %.

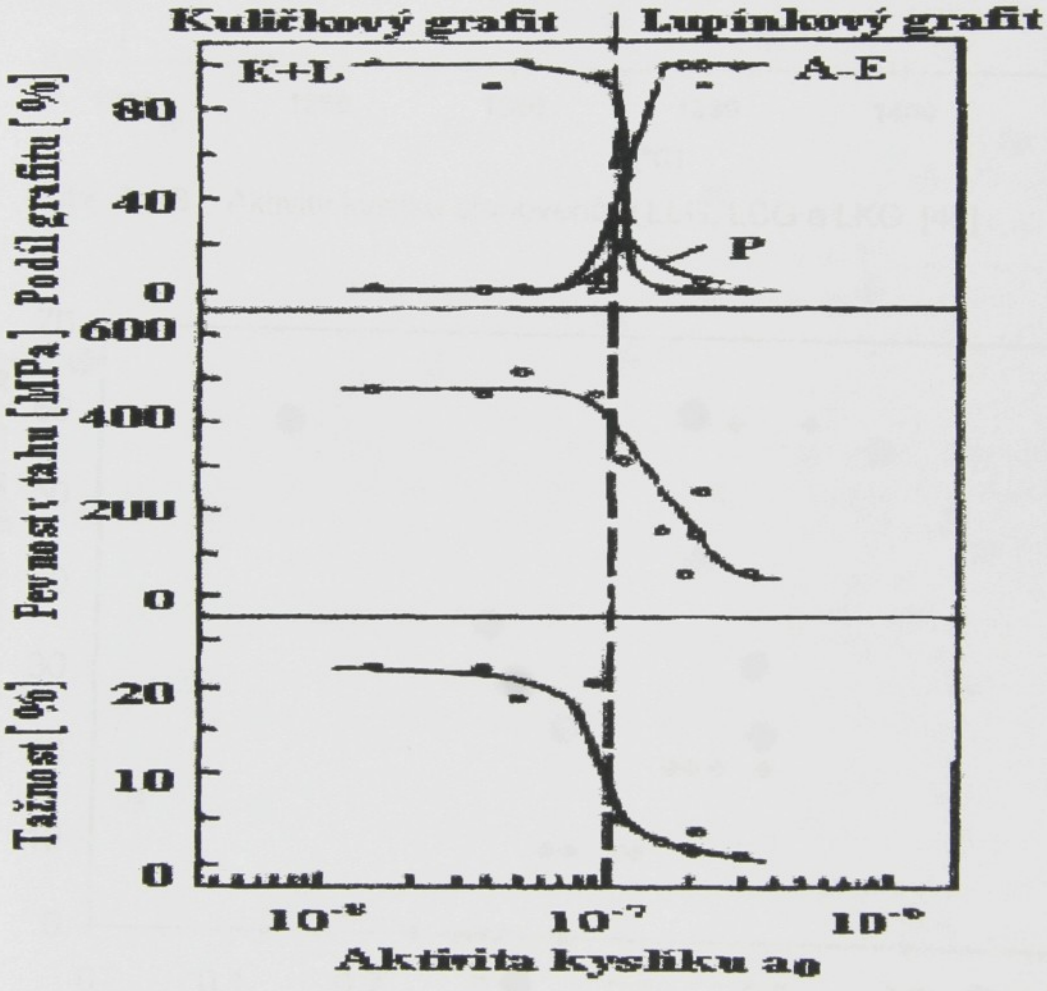
Vliv kyslíku – O dělíme na vázaný kyslík (oxidy) s volným kyslíkem (aktivní O_2) v tavenině a vázaný kyslík (oxidy) ve ztuhlém odlitku.
ŠLAHOROU [20] zjištěné obsahy celkového kyslíku v litině na žlábku :

- horkovětrné kuplovny (GHW) se pohybovaly v rozmezích 0,0055 až 0,0145%,zjištěný obsah kyslíku v oxidech s počáteční teplotou redukce nad 1 600 °C byl v rozmezí 53 až 83 % z celkového obsahu kyslíku. V pánvi se pak celkový obsah kyslíku snížil na 0,0018 až 0,0060 % a v odlitku zůstal v podstatě stejný.
  Naopak nižší výskyt redukovatelných oxidů při teplotě 1 600 °C v pánvi 6 až 20 % se v odlitku opět zvýšil na 60 až 70 %.
- studenovětrné kuplovny se pohybovaly v rozmezí 0,0052 až 0,0180 %, přičemž množství oxidů s počáteční teplotou redukce nad 1 600 °C se pohybovalo v rozmezí 45 až 95 % z celkového obsahu kyslíku. Vzorky z pánve obsahovaly 0,0020 až 0,0070 % celkového kyslíku, množství oxidů s počáteční teplotou redukce 1 600 °C byl v rozmezí 54 až 67 %.
- indukční pece se pohybovaly v rozmezí 0,0020 až 0,0040 %, v pánvi po modifikaci a naočkování se snížil pouze na úroveň od 0,00065 do 0,0010 %.

V poslední době se řada autorů nejen ve světě, ale i v ČR (např. KONEČNÝ [21], JELÍNEK [22]) věnovala studiu závislosti množství volného aktivního kyslíku v tavenině před a po modifikaci LKG ke kontrole kvality provedené modifikace (např. poměr lupínkového a kuličkového grafitu) tzn. například k výsledným mechanickým vlastnostem. Aktivita rozpuštěného kyslíku v tavenině je ovlivňována především afinitou C a Si ke kyslíku, jehož koncentrace se pohybuje řádově v desetinách či v jednotkách ppm. K jeho stanovení se používá metody měření elektromotorického napětí (EMN) na galvanickém článku, kde je pevným elektrolytem žáruvzdorný oxid vykazující iontovou vodivost. Součástí kyslíkového koncentračního článku je i referenční látka se známou hodnotou aktivity kyslíku a kovový kontakt. EMN se určuje pomocí Nernstova zákona a závisí na parciálním tlaku (aktivitě) kyslíku v referenčním materiálu a v tavenině při změřené teplotě taveniny. Že oxidy (SiO_2, La_2O_3) působí jako krystalizační zárodky pro nukleaci grafitu, je všeobecně známo. Při zvyšování obsahu kyslíku má kyslík nejprve grafitizační účinek, při jeho dalším zvyšování však převažuje účinek karbidotvorný. [25,26]
Nukleace SiO_2 na zárodcích oxidů prvků s vyšší afinitou ke kyslíku (Al, Ca, Ba, Ca) je heterogenní. Při vyšších teplotách mohou být SiO_2 i stabilnější oxidy redukovány uhlíkem. To znamená snížení krystalizačních zárodků, a tedy zhoršení krystalizačních schopností litiny. S redukcí oxidů uhlíkem je spojen i pokles celkového obsahu kyslíku v litině při zvyšování teploty. [20,25]

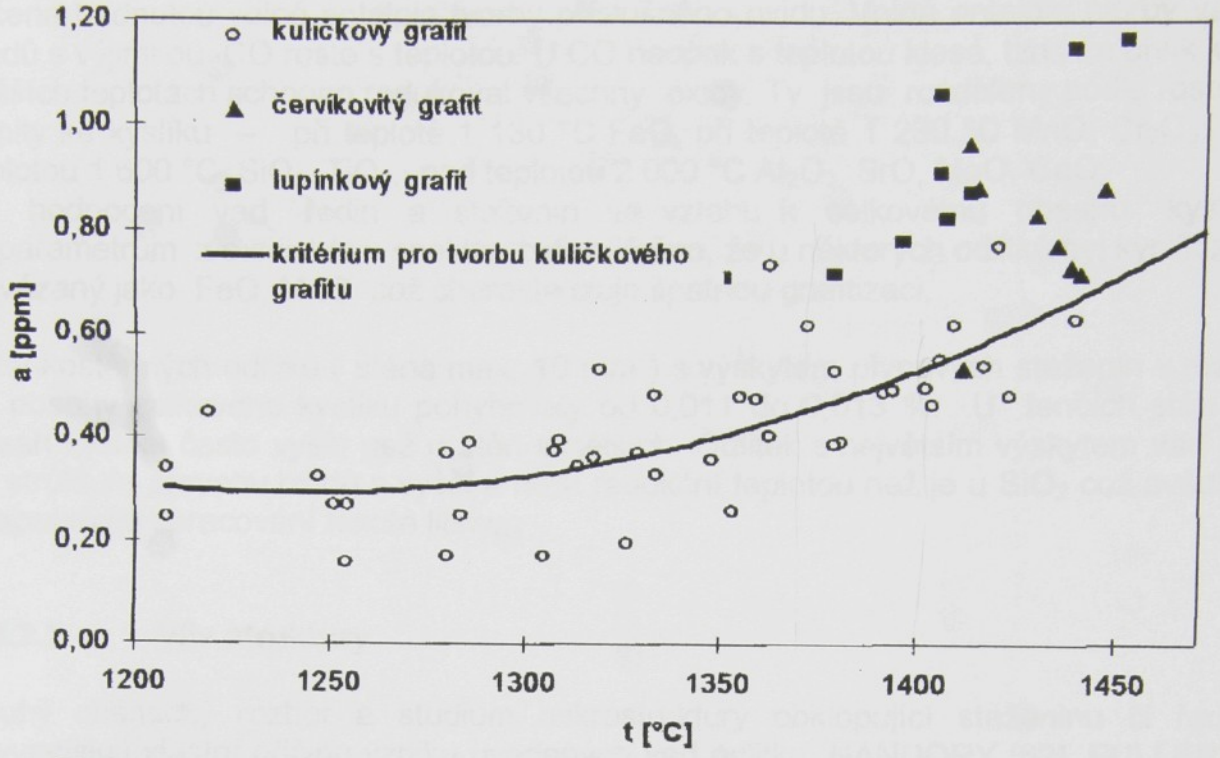
Významný vliv kyslíku a síry při tvorbě kuličkového grafitu byl prokázán při vakuovém tavení litiny s nízkým obsahem Si, která měla tendenci ke tvorbě kuličkového grafitu i bez přítomnosti modifikátoru. Tato tendence byla způsobena pravděpodobně odstraněním povrchově aktivních prvků a zvýšením povrchového napětí taveniny, které po modifikaci vzroste o 30 – 50 %. Krystal pak roste tak, aby zachoval minimální povrch, než aby dodržel krystalografický směr, ve kterém jsou vazby mezi základními rovinami velmi slabé. [24]

Jako maximální hranici nutnou pro dosažení kuličkového grafitu stanovil HUMMER [27] hodnotu aktivního kyslíku na $a_o = 10^{-7}$ ppm pro konkrétní teplotu taveniny. Autor v práci uvádí závislost mezi aktivitou kyslíku a tvarem grafitu spolu s mechanickými vlastnostmi litin viz obrázek č. 17.

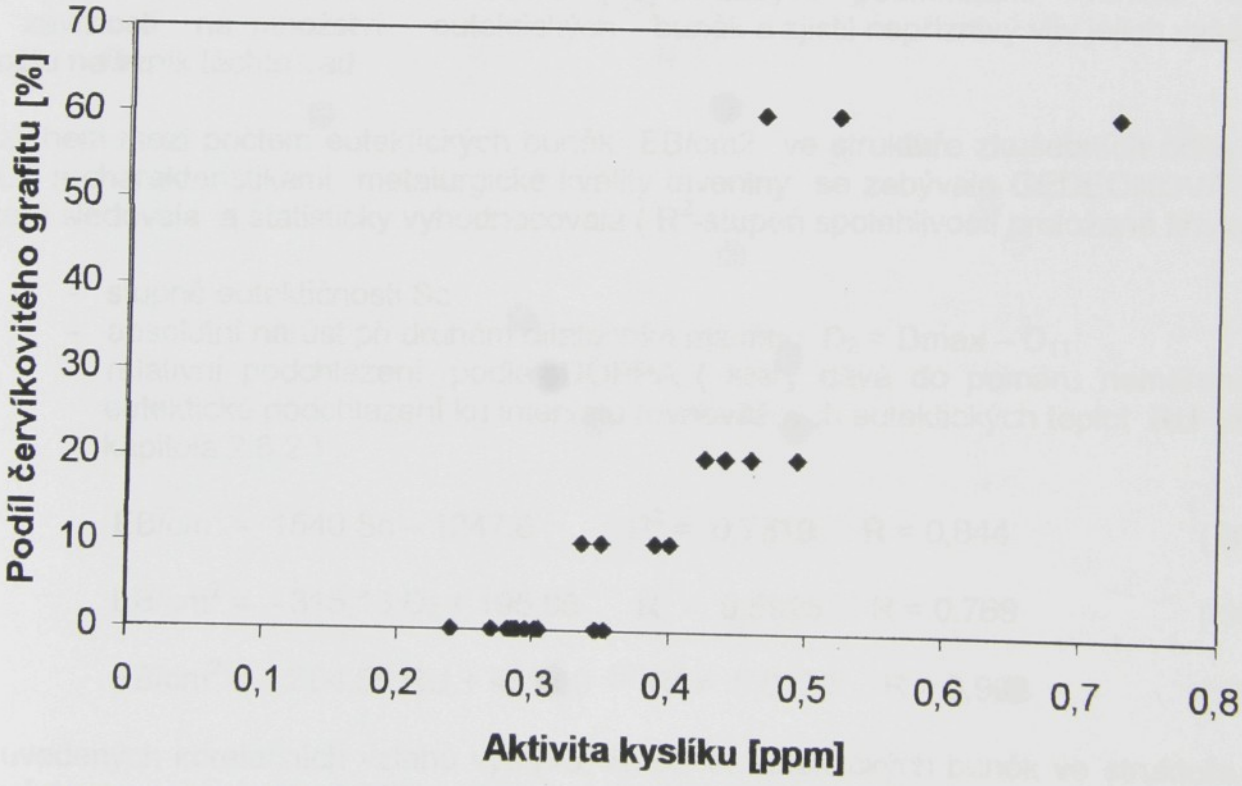


Obr. č. 17 Závislost tvaru grafitu a mech. vlastností litiny na aktivitě kyslíku [27]

Výsledkem experimentálních zkoušek na TU Liberec u LLG, LČG a LKG [22,45] vycházejících z poznatků HUMMERA, jsou naměřené hodnoty aktivity kyslíku rozšířené o vazbu na teplotu měření viz obrázek č. 18. a opačně podíl červíkovitého grafitu ve struktuře LKG v závislosti na aktivitě kyslíku v tavenině při referenční teplotě 1400 °C viz obrázek č. 19.



Obr. č. 18 Aktivity kyslíku stanovené u LLG, LČG a LKG [45]



Obrázek č. 19 Podíl červíkovitého grafitu ve struktuře LKG v závislosti na aktivitě kyslíku v tavenině při referenční teplotě 1400 °C [22]

Stanovením významu obsahů a druhů vazeb kyslíku na výskyt charakteristických vad v odlitcích z litiny se zabýval ŠLAHORA [20]. Na zkoumaných vzorcích stanovoval pomocí automatického plynového analyzátoru LECO TC 336 oxidické spektrum s uvedenými redukčními teplotami jednotlivých zjištěných oxidů. Existence oxidů je

určena hodnotou volné entalpie tvorby příslušného oxidu. Volná entalpie tvorby všech oxidů s výjimkou CO roste s teplotou. U CO naopak s teplotou klesá, tzn., že uhlík je při vyšších teplotách schopen redukovat všechny oxidy. Ty jsou rozděleny podle rostoucí afinity ke kyslíku – při teplotě 1 130 °C FeO, při teplotě 1 230 °C MnO, Cr_2O_3, nad teplotou 1 600 °C SiO_2, TiO_2, nad teplotou 2 000 °C Al_2O_3, SrO, MgO, CaO.
Při hodnocení vad ředin a staženin ve vztahu k celkovému obsahu kyslíku a parametrům z oxidického spektra bylo zjištěno, že u některých odlitků byl kyslík z 80 % vázaný jako FeO, MnO což charakterizuje špatnou grafitizaci.

U tenkostěnných odlitků (stěna max. 10 mm) s výskytem plynových staženin v rozích se obsahy celkového kyslíku pohybovaly od 0,011 do 0,013 %. U tenčích stěn byl obsah kyslíku často vyšší než u stěn silnějších. Odlitek s největším výskytem vad měl ve struktuře převahu oxidů s vyšší a nižší redukční teplotou než je u SiO_2 což svědčí o nesprávném zpracování tekuté litiny.

2.4.2.2 Vliv struktury

Pouhý chemický rozbor a studium mikrostruktury obklopující staženinu či ředinu nevysvětlují vlastní příčinu vzniku uvedených vad odlitku, NANDORY [62]. FULLER [5] nenalezl žádný vztah mezi charakterem grafitu a sklonem k tvorbě staženin. U eutektických a nadeutektických litin nalezl UNGERMAN [61] určitou souvislost mezi výskytem feritu a vznikem ředin. HOUŠŤ [48] se zabýval podmínkami vzniku ředin v závislosti na množství eutektických buněk a zjistil nepříznivý vliv jejich vyššího počtu na vznik těchto vad.

Vztahem mezi počtem eutektických buněk EB/cm2 ve struktuře zkušebních odlitků z LLG a charakteristikami metalurgické kvality taveniny se zabývala GEDEONOVÁ [6], která sledovala a statisticky vyhodnocovala (R^2-stupeň spolehlivosti proložené křivky):

- stupně eutektičnosti Sc
- absolutní nárůst při druhém dilatačním maximu $D_2 = Dmax - D_{11}$
- relativní podchlazení podle DÓPPA (který dává do poměru naměřené eutektické podchlazení ku intervalu rovnovážných eutektických teplot RU viz kapitola 2.6.2)

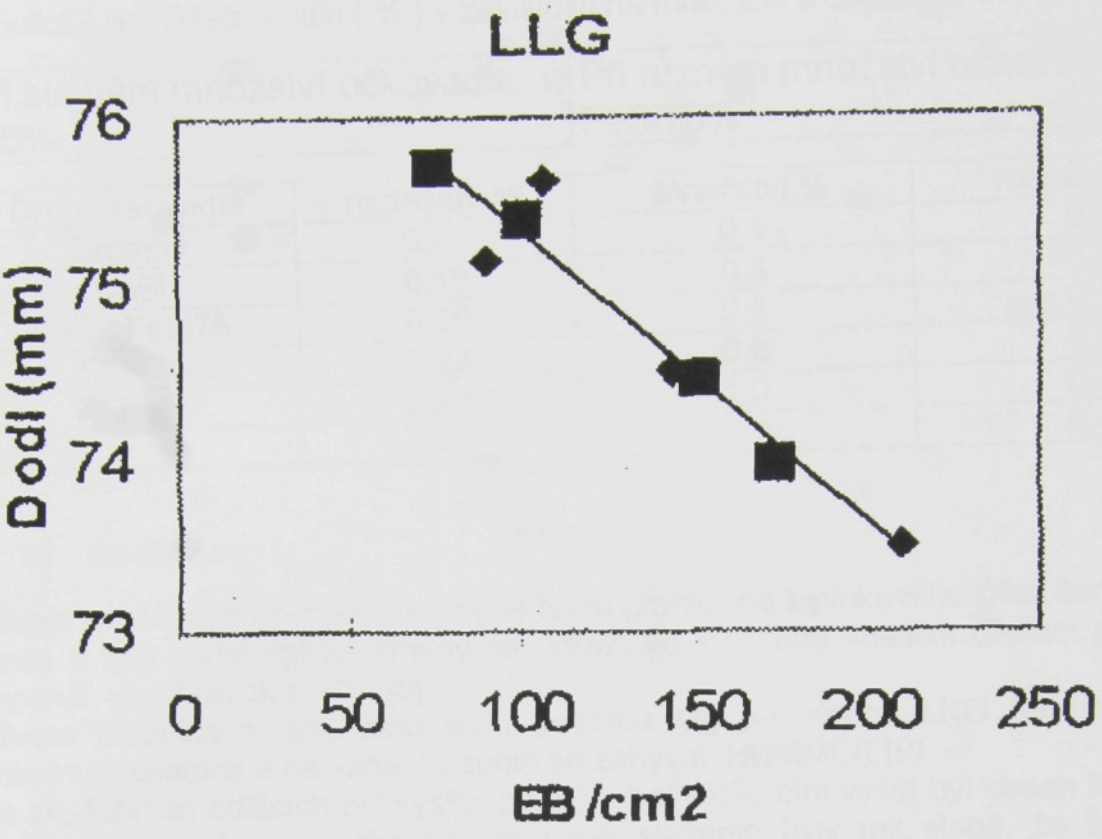
$$EB/cm^2 = 1540.Sc - 1247,6 \qquad R^2 = 0,7819 \qquad R = 0,844 \qquad (37)$$

$$EB/cm^2 = -315,13.D_2 + 195,86 \qquad R^2 = 0,5925 \qquad R = 0,769 \qquad (38)$$

$$EB/cm^2 = -384,58.RU + 431,69 \qquad R^2 = 0,8129 \qquad R = 0,902 \qquad (39)$$

Z uvedených korelačních vztahů vyplývá, že počet eutektických buněk ve struktuře se zvyšuje se stupněm eutektičnosti Sc, klesá se zvětšující eutektickou expanzí D_2 a zvýšeným relativním podchlazením RU. Tavenina se vyráběla v kuplovně průměr 900 mm s předpecím, následně grafitizačně očkovaná.

Podle GEDEONOVÉ [6] vysoký počet eutektických buněk charakterizuje dobrou kvalitu odlitku a dobrou kvalitu odlévané litiny, která se odráží i v konečném rozměru, délce odlitku – Dodl (mm). Zhoršováním metalurgické kvality (nižší počet buněk) konečný rozměr odlitku narůstá a tím vzniká i případná náchylnost ke vzniku porezity a staženin viz obrázek č. 20.



Obr. č. 20 Vztah mezi počtem eutektických buněk EB/cm^2 ve struktuře LLG a konečným rozměrem odlitku Dodl [6]

2.4.2.3 Vliv úpravy tekuté litiny

a) grafitizační očkování

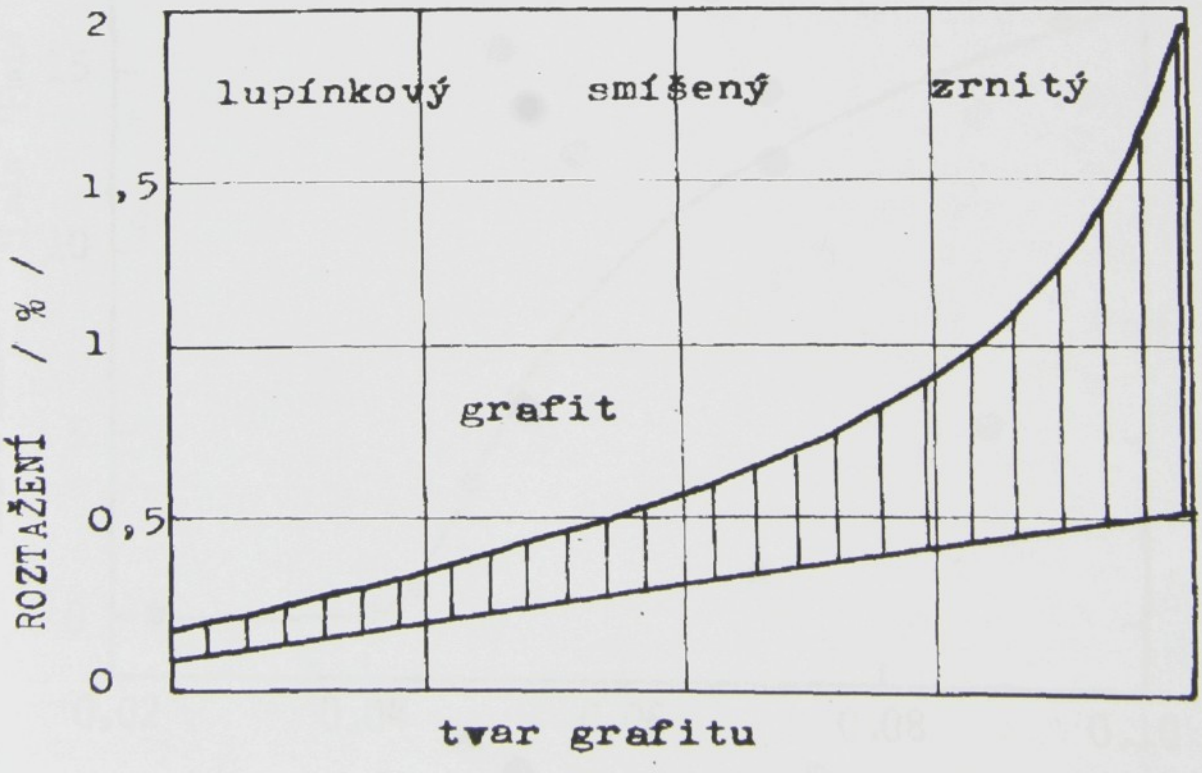
Studiem křivek termální analýzy očkovaných a neočkovaných litin přišel MERCHENTA [5] na změnu polohy a na rozšíření intervalu tuhnutí očkovaných litin. Pozdržením tvorby licí kůry se víc namáhá a deformuje líc formy, což má údajně za následek větší výskyt staženin. Většina autorů, jako např. FULLER, WALTON, NICHOLAS [5] , zjistila u LLG nepříznivý vliv grafitizačních úprav ke zvýšení eutektické nukleace na sklon k výskytu staženin.Naopak BRADÍK [63] vysledoval menší sklon k výskytu otevřených staženin u litiny podeutektické očkované než u neočkované.
Obdobné pozitivní výsledky na litině s uhlíkovým ekvivalentem CE = 3 – 4,3 očkované FeSi45% dosáhl HOUŠTĚ [48]. Ke zkouškám použil těleso dle WITTMOSERA. Čím byl uhlíkový ekvivalent CE nižší, tím byl pozitivnější vliv očkování na snížení výskytu staženin.
Příznivý vliv očkování na výskyt zmetků studoval PREJGERSON [44], který vnášel do taveniny předslitiny FeSi45 % s lepšími výsledky než FeSi75 %. Průzkumem lineární dilatace při grafitické expanzi očkovaných litin, provedené VONDRÁKEM a BENEŠEM [42] viz tabulka č. 6, bylo zjištěno, že roztažení se mění v závislosti na druhu a množství použité očkovací látky.
Při hodnocení vlivu vícenásobného očkování u syntetické litiny zjistil GORENKO [64] největší příznivý vliv na hodnotu roztažení u prvního očkování. Zkoumal také očkující přísadu na bázi chromu Cr bez výrazného vlivu na roztažení.
Příznivý vliv očkování lze očekávat u nepoddajných forem a naopak. [5]

Tabulka č.6 Dilatace litin (%) v závislosti na množství a druhu očkovadla [42]

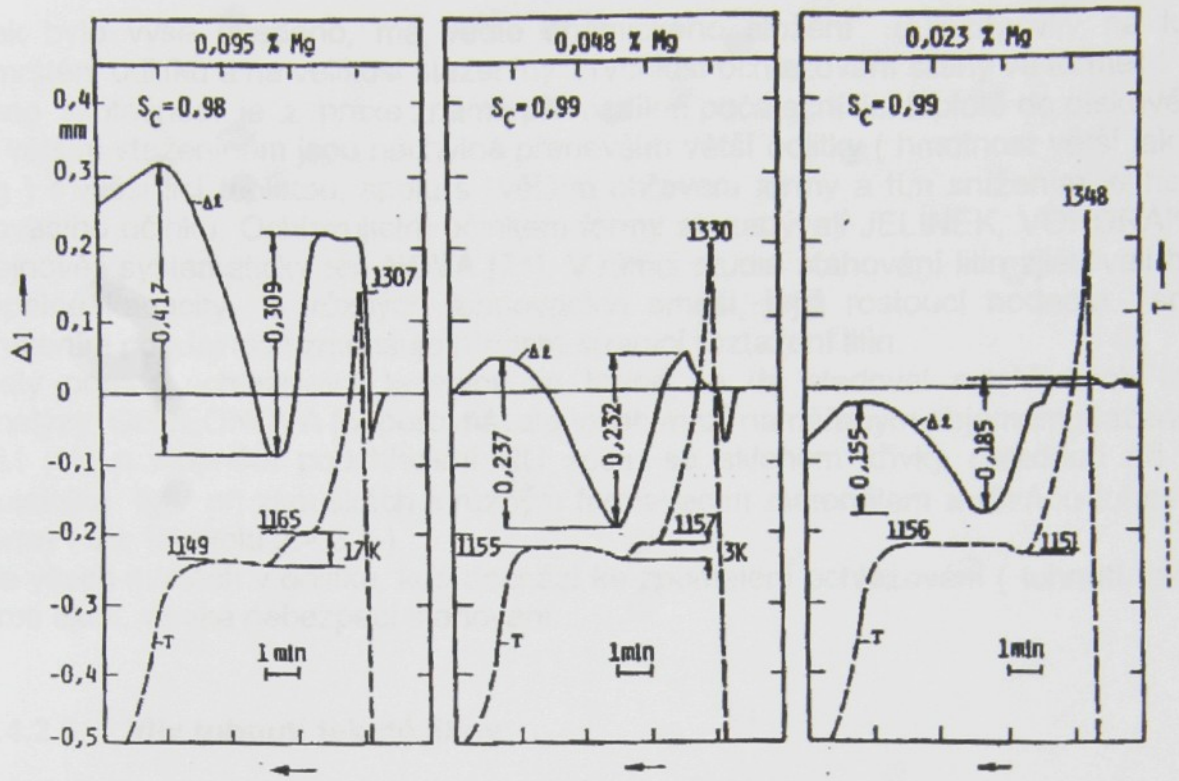
Při stejném množství očkovadla 0,5%		Při různém množství očkovadla FeSi75%	
Druh očkovadla	roztažení %	Množství %	roztažení v %
Gramod	0,09	0,4	0,20
CaSi	0,18	0,5	0,23
CaSi+FeSi75	0,20	0,6	0,18
FeSi75	0,23	0,8	0,24
ALFeSi	0,26	1,0	0.40
		1,1	0,45

b) modifikace

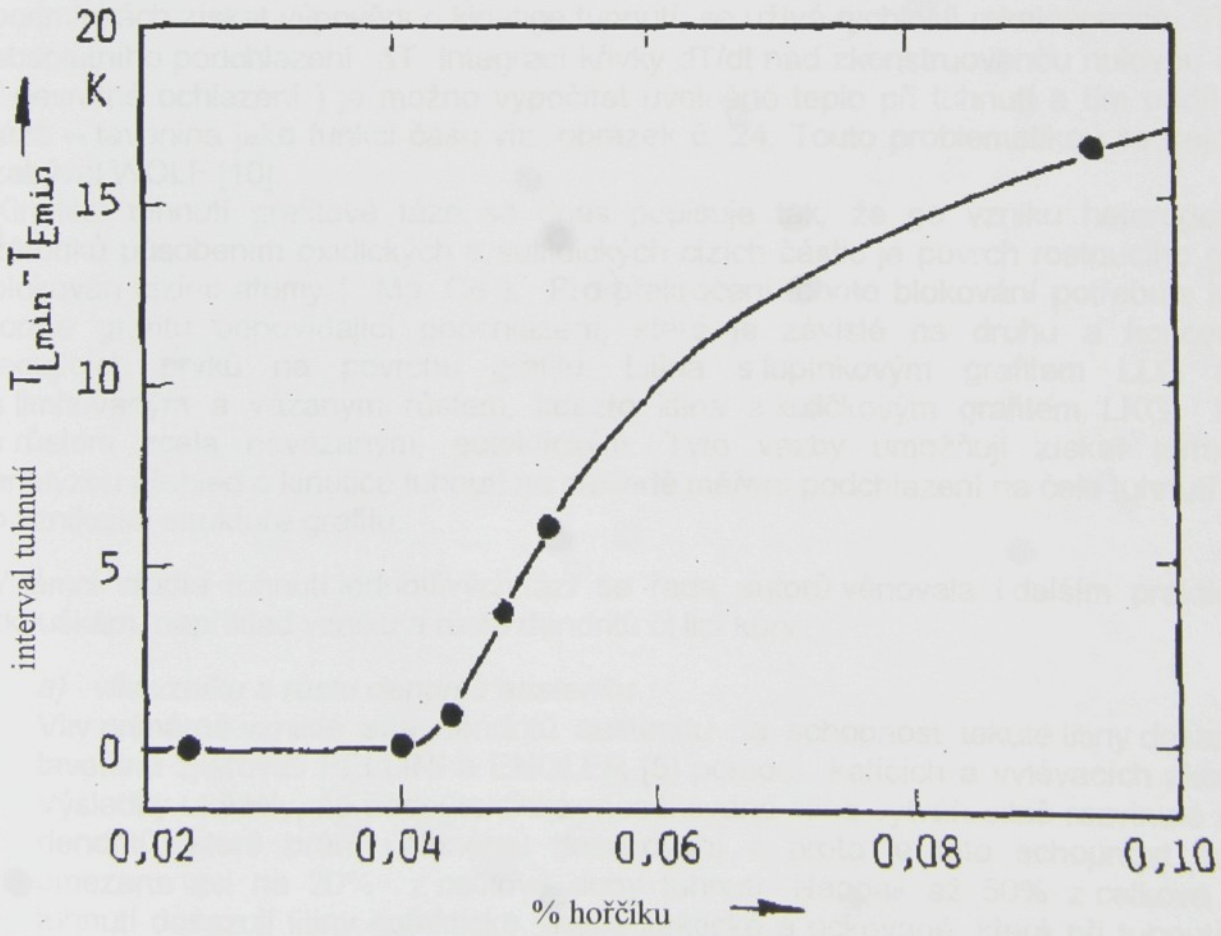
Vlivem modifikace dochází ke změně tvaru grafitu, od lupínkového přes červíčkovitý po zrnitý a tyto metalurgické změny se odráží ve zvětšené lineární dilataci při grafitické expanzi viz obrázek č. 21. [5]
Vlivem modifikace, tzn. množstvím hořčíku Mg při výrobě LKG na průběh křivek chladnutí, dilatace a na vznik staženin se zabýval HUMMER [9].
Ve zkušebních odlitcích byl výskyt porezity tím větší, čím vyšší byl obsah Mg. Všechny možné vlivy vsázky a očkování na vznik staženin byly tak slabé, že byly překryty působením obsahu Mg v modifikátoru. Spojitost mezi vzrůstajícím obsahem Mg (0,023 - 0,095 %) při hodnotách Sc (0,98 , 0,99) a vzrůstajícím sklonem ke staženinám je patrná z rozdílů dilatačních a teplotních křivek na obrázku č. 22. Další souvislost byla nalezena mezi Mg a intervalem tuhnutí, který po překročení hodnoty 0,04 % skokově stoupá strmě vzhůru viz. obrázek č. 23, což HUMMER dokládá na skokovém nárůstu sklonu ke vzniku staženin.



Obr. č. 21 Vliv tvaru grafitu na velikost lineárního roztažení při grafitické expanzi [5]



Obr. č. 22 Vliv modifikačního Mg na průběh T a D křivek u LKG [9]



Obr. č. 23 Závislost velikosti intervalu tuhnuti na obsahu Mg% po modifikaci LKG [9]

2.4.2.4 Vliv ochlazovacího účinku formy

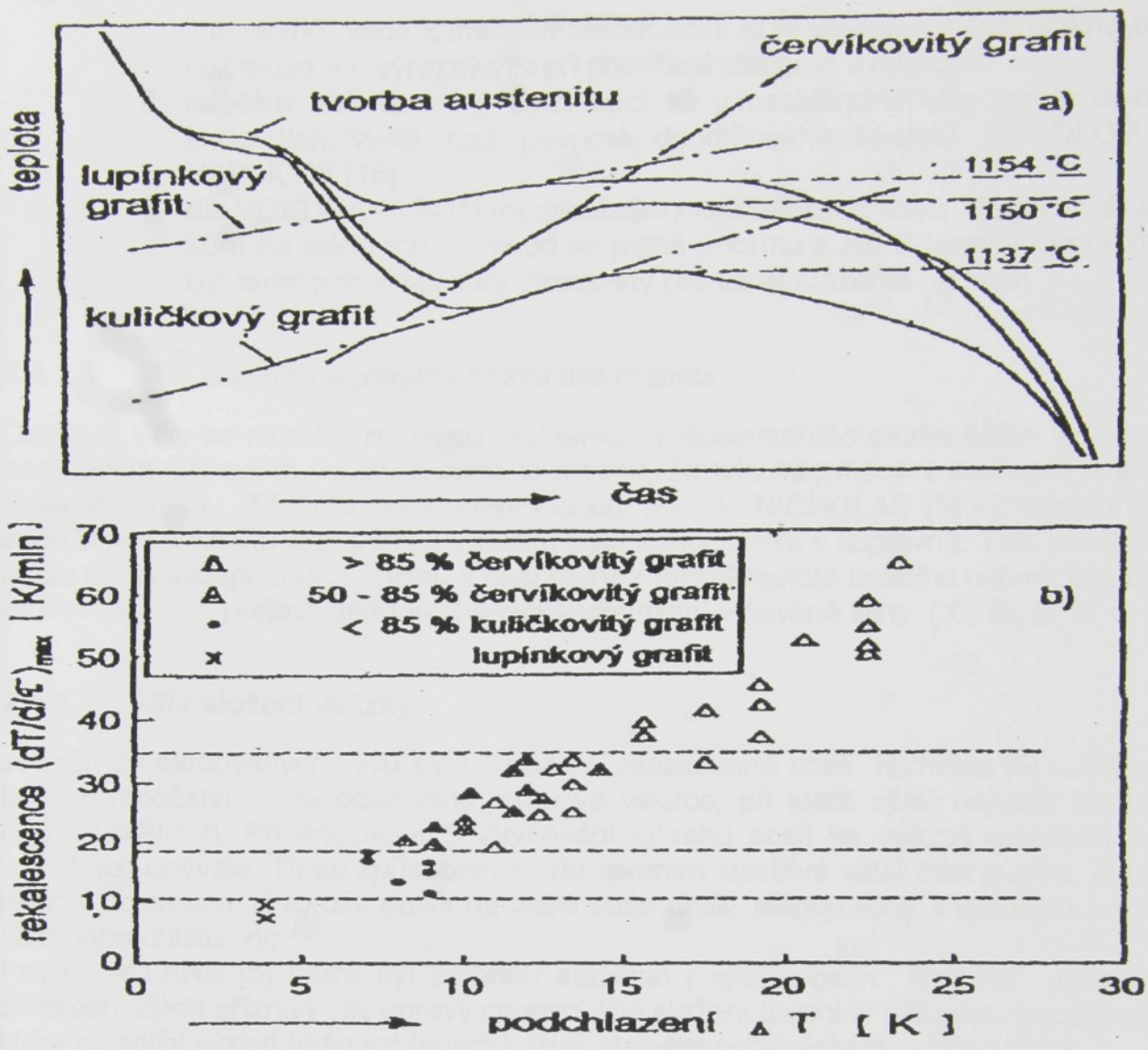
Jak bylo výše uvedeno, má vedle chemického složení důležitý vliv na konečné smrštění odlitku a na velikost staženiny i rychlost ochlazování slitiny ve formě.
Tato skutečnost je z praxe známá při rozdílné počáteční licí teplotě do pískové formy. K větším staženinám jsou náchylné především větší odlitky (hmotnost větší jak cca 50 kg) s vyšší licí teplotou, spolu s větším ohřevem formy a tím snížením jejího ochlazovacího účinku. Ochlazujícím účinkem formy se zabývali JELÍNEK, VONDRÁK [17] a nejnověji systematicky též NOVÁ [71]. V rámci studia stahování litin zjišťovali hodnotu tepelné kapacity b_f různých formovacích směsí, jejíž rostoucí hodnota spolu se snížením poddajnosti zmenšuje předsmršťovací roztažení litin.
Celý proces ochlazování taveniny ve formě se dá sledovat na křivkách termické analýzy. GEDEONOVÁ [6] porovnávala vztah mezi naměřeným objemem staženin Vst (%) a stupněm podchlazení RU spolu se sklonem křivky chladnutí při tuhnutí eutektika $tg\beta$ při zkouškách s různým formovacím materiálem a různou tuhostí rámu formy (viz kapitola 2.4.3.4).
Ve všech místech v odlitku, kde dochází ke zpomalení ochlazování (tuhnutí taveniny) proti okolí, vzniká nebezpečí stahování.

2.4.2.5 Vliv tuhnutí tekuté litiny

Studium kinetiky tuhnutí různých druhů litin patří mezi základní metody získávání informací o růstu kovové a grafitové fáze. Jedna z nejpoužívanějších metod, která kvantifikuje a určuje závislost mezi komplexním mechanizmem růstu uvedených fází, je termická analýza, jejímž výsledkem jsou křivky chladnutí a z nich odvozené parametry. Pro určení charakteristických hodnot, které by dovolily při definovaných okrajových podmínkách získat výpovědi o kinetice tuhnutí, se užívá rychlosti rekalescence dT/dt a absolutního podchlazení ΔT. Integrací křivky dT/dt nad zkonstruovanou nulovou čárou (nevratné ochlazení) je možno vypočítat uvolněné teplo při tuhnutí a tím podíl tuhé fáze – tavenina jako funkci času viz obrázek č. 24. Touto problematikou se nejnověji zabýval WOLF [10].
Kinetika tuhnutí grafitové fáze se dnes popisuje tak, že po vzniku heterogenních zárodků působením oxidických a sulfidických cizích částic je povrch rostoucího grafitu blokován cizími atomy (Mg, Ce). Pro překročení tohoto blokování potřebuje každá forma grafitu odpovídající podchlazení, které je závislé na druhu a koncentraci legujících prvků na povrchu grafitu. Litina s lupínkovým grafitem LLG tuhne s limitovaným a vázaným růstem, kdežto litina s kuličkovým grafitem LKG tuhne s růstem zcela nevázaným, eutektickým. Tyto vazby umožňují získat termickou analýzou přehled o kinetice tuhnutí na základě měření podchlazení na čele tuhnutí a tím o vznikající struktuře grafitu.

V rámci studia tuhnutí jednotlivých fází se řada autorů věnovala i dalším praktickým zkouškám, například vzniku a růstu dendritů či licí kůry :

a) vliv vzniku a růstu dendritů austenitu
Vliv primárně vzniklé sítě dendritů austenitu na schopnost tekuté litiny dosazovat taveninu zjišťovali PELLINI a ENGLER [5] pomocí kalících a vylévacích zkoušek. Výsledky ukázaly, že podeutektická neočkovaná litina vytváří silně rozvinuté síťoví dendritů, které brání účinnému dosazování a proto je tato schopnost časově omezena asi na 20% z celkové doby tuhnutí. Naopak až 50% z celkové doby tuhnutí dosazují litiny eutektické, nadeutektické a očkované, které při tuhnutí tvoří kompaktní eutektické shluky.



Obr. č. 24 Termická analýza litin provedená interpretací křivek chladnutí a odvozené parametry kvantifikující výpověď o kinetice tuhnutí [10]

b) vliv doby vzniku pevné licí kůry

Vznik pevné licí kůry a dobu jejího vytvoření na okraji odlitku zkoumal ENGLER [5]. Ta se vytvoří v čase odpovídajícímu asi 25% celkové doby tuhnutí, protože při tuhnutí austenitu vznikne jen málo pevná síť dendritu a tak počátek vzniku únosné kůry spadá až do období tuhnutí eutektika. Její včasné vytvoření omezuje vliv slévárenské formy na předsmršťovací roztažení, toto roztažení omezuje a tím snižuje i množství ředin a staženin. V této souvislosti byl sledován vliv obsahu fosforu P na dobu vzniku licí kůry. Podstatný vliv na prodloužení této doby byl zjištěn teprve při obsazích vyšších jak 0,5% P.

c) vliv dilatace pevné licí kůry odlitku

Jak z řady zkoušek vyplývá, jsou výsledné staženiny ovlivněny předsmršťovacím roztažením pevné licí kůry, ať je příčinou dilatace cokoli. Je zřejmé, že u grafitických litin je touto příčinou právě grafitická expanze. Důvodem roztažení této ztuhlé vrstvy může pravděpodobně být dále i :

1. krystalizační tlak uplatňující se u slitin s velkým dvoufázovým pásmem tuhnutí v souvislosti s vylučováním plynů. Tímto způsobem lze vysvětlit roztažení licí kůry u očkovaných či plyny nasycených litin. Zužování dvoufázového pásma, např. dosažením strmějšího teplotního spádu

v tavenině, vede k menším deformacím kůry vlivem krystalizačního tlaku, což může mít výrazný vliv při potlačení staženin v odlitcích.

2. kapilární tlak taveniny uplatňující se v mezidendritickém prostoru,kdy je tento tlak vyšší než pevnost dendritového skeletu KOROLOV [5], HAVLÍČEK [18].
3. dle VONDRÁKA [41] i metalostatický tlak tekutého kovu, který tlačí ztuhlou kůru na stěnu formy.Pokud se jedná o formu z JBFS (bentonit) pak může být tento pohyb licí kůry významný pro vznik staženin a ředin.

2.4.2.6 Vliv tavícího agregátu a tavícího režimu

Oba tyto vlivy se nachází na okraji problematiky dosavadního studia příčin vzniku vad homogenity litinových odlitků a proto je možné, že tyto informace v dostupné odborné literatuře chybí. Z tohoto pohledu vyhodnotil pouze NICHOLAS [5] vzrůstající sklon šedé litiny ke vzniku staženin na začátku a na konci tavení v kuplovně. Tato skutečnost může mít pravděpodobně příčinu v nesprávné (nízké) teplotě tavícího režimu kuplovny, což se navenek projeví změnou chemického složení vytavené litiny (C, Si, S, N, O).

2.4.2.7 Vliv složení vsázky

Jedním ze sledovaných vlivů bylo množství vsázkované oceli. Nicholas [5] uvádí jako kritické množství 50 % ocelového šrotu ve vsázce, při které zjistil největší množství ředin v odlitcích. Při snižování či zvyšování obsahu oceli ve vsázce množství ředin v odlitcích ubývalo. Tímto způsobem se do taveniny dostává větší část dusíku, kterého je ocel nositelem. Protože dusík na sebe váže uhlík, stahují litiny s vysokým podílem vázaného uhlíku více.
Podle ALLANA [5] může být příčinou staženin i vyšší obsah křemíku v surových železech. Zjistil příznivý vliv úpravy chemického složení taveniny přísadou ferosilícia, při které se snížil výskyt ředin vzhledem k jinak stejnému chemickému složení litiny.
Vliv surových želez vyrobených v různých železárnách v Rusku v 60 – tých letech studovali SOKOLOV a PREJGERSON [44]. Ve výsledcích uvádějí až 20 % rozdíl výskytu ředin v odlitcích při zpracování různých lokalit, například : Nižnětagilských (pozitivní) proti Kosogorským (negativní) a při výrobě hlav válců motorů mezi surovinou z lokalit Jelizavetských (pozitivní) proti Pašijským (negativní).

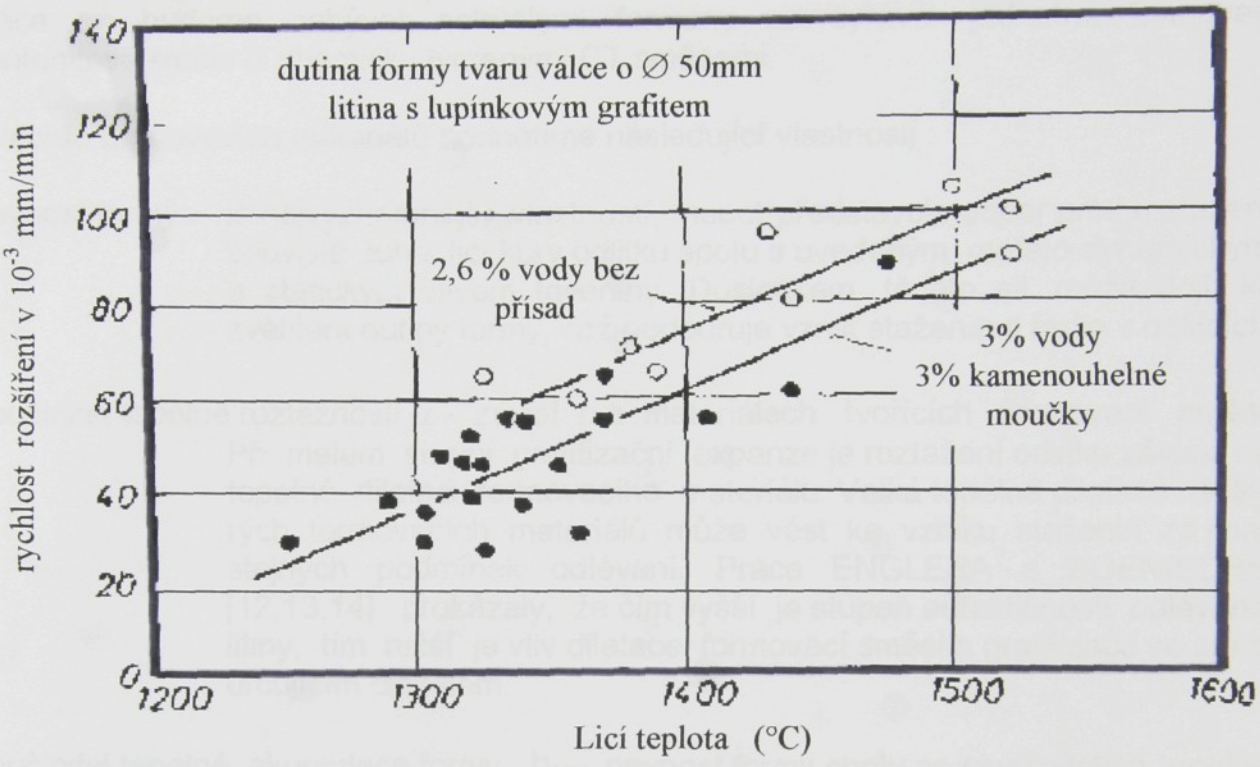
2.4.2.8 Vliv teploty přehřátí při tavení litiny

Touto problematikou se v minulosti zabývali HOUŠŤ [48] a BALINSKÝ [5]
Oba shodně zjistili kritickou teplotu přehřátí a odlévání 1400 °C, při které dochází k maximálnímu předsmršťovacímu roztažení. V obou směrech od této teploty hodnota předsmršťovacího roztažení klesala. Oba činitelé, jak teplota přehřátí, tak teplota odlévání ovlivňují eutektickou prodlevu a grafitizaci, čímž působí na roztažení litiny během tuhnutí.

2.4.2.9 Vliv licí teploty

Při studiu vlivu licí teploty na vznik a množství staženin či ředin je nutné přihlédnout k pevnosti a teplotní vodivosti formy. Čím vyšší je teplota tavenin, tím větší je úbytek objemu ztuhlé litiny. Vlivem licí teploty na pohyb stěny formy se zabýval BOENISCH [14]. Licí teplota výrazně ovlivňuje nárůst napětí v povrchové vrstvě formy a tím i rychlost, kterou se forma rozšiřuje. Na obrázku č. 25 jsou znázorněny rychlosti dilatací

stěny forem u zkoušek se šedou litinou v závislosti na licí teplotě pro dvě formovací hmoty na bázi křemenného písku. Rychlosti rozšiřování na jedné straně vzrůstají s teplotou lití, ale na druhé straně jsou u různých formovacích hmot odlišně velké. Formovací směs bez příměsí vykazuje trochu vyšší rychlosti rozšiřování než směs s příměsí 3% uhelného prachu,pravděpodobně vlivem objemových změn a poddajností uhelného prachu.



Obr. č. 25 Rychlosti rozšiřování stěny formy v intervalu do 1,5 min po odlití v závislosti na licí teplotě pro dvě formovací směsi [14]

Licí teplota má také přímý vliv na stupeň grafitizace (celkové množství vyloučeného grafitu).Touto problematikou se zabývali BALINSKÝ a WALLACE [5] a na praktických zkouškách prokázali, že při vysokých licích teplotách setrvává litina po nalití do formy dlouho tekutá, prodlužuje se doba tuhnutí, čímž se zvětšuje stupeň grafitizace a tím I množství vyloučeného grafitu. Proto HOUŠŤ [48] doporučuje odlévání taveniny s vysokou licí teplotou do pevných forem ke snížení výskytu ředin a staženin. Naopak při nízké licí teplotě se těžiště grafitizace přesouvá k nižším teplotám a množství vyloučeného grafitu je relativně menší.

2.4.2.10 Vliv doby odlévání

Z obecné rozvahy vyplývá, že množství a velikost staženin bude tím menší, čím větší bude časové překrytí intervalu odlévání s intervalem tuhnutí. Pro objem staženin bude rozhodující poměr tuhé a tekuté litiny v době ukončení odlévání. Při odlévání do nepevné např. bentonitové formy, kde dochází k roztažení formy a licí kůry odlitku při dlouhé době odlévání , se vlije do formy větší množství taveniny což sníží význam výše uvedeného poměru intervalů.
Přestože je doba odlévání tekuté litiny do formy ovlivňována především technologickými činiteli, má i ona relativní vliv na výslednou velikost staženin a ředin.

2.4.3 Vliv formovacího materiálu

2.4.3.1 Vliv základních vlastností pískových forem

Z předchozích kapitol je zřejmé, že po nalití tekutého kovu do formy dochází k reakci mezi taveninou a stěnou formy, na kterou kov působí dynamicky během odlévání, staticky po naplnění dutiny do okamžiku ztuhnutí a tepelně po celou tuto dobu, která je rozhodující pro vznik studovaných vad odlitků - ředin a staženin. Vzhledem k zaměření práce se budeme zabývat netrvalými formami ze syrové jednotné formovací bentonitové směsi či chemicky tvrzenými CT směsemi.

U těchto formovacích materiálů hodnotíme následující vlastnosti :

Pevnost formy – je nejvýznamnější vlastností, neboť představuje odpor proti roztažení souvislé tuhé licí kůry odlitku spolu s uvedeným metalo-dynamickým a statickým vlivem taveniny. Důsledkem těchto sil může dojít ke zvětšení dutiny formy, což podporuje vznik staženin a ředin v odlitcích.

Součinitel tepelné roztažnosti α - závisí n a materiálech tvořících formovací směs. Při malém stupni grafitizační expanze je roztažení odlitku závislé na tepelné dilataci formovacího materiálu. Velká tepelná dilatace některých formovacích materiálů může vést ke vzniku staženin za jinak stejných podmínek odlévání. Práce ENGLERA a BOENISCHE [12,13,14] prokázaly, že čím vyšší je stupeň eutektičnosti odlévané litiny, tím nižší je vliv dilatace formovací směsi a grafitizace se stává určujícím činitelem.

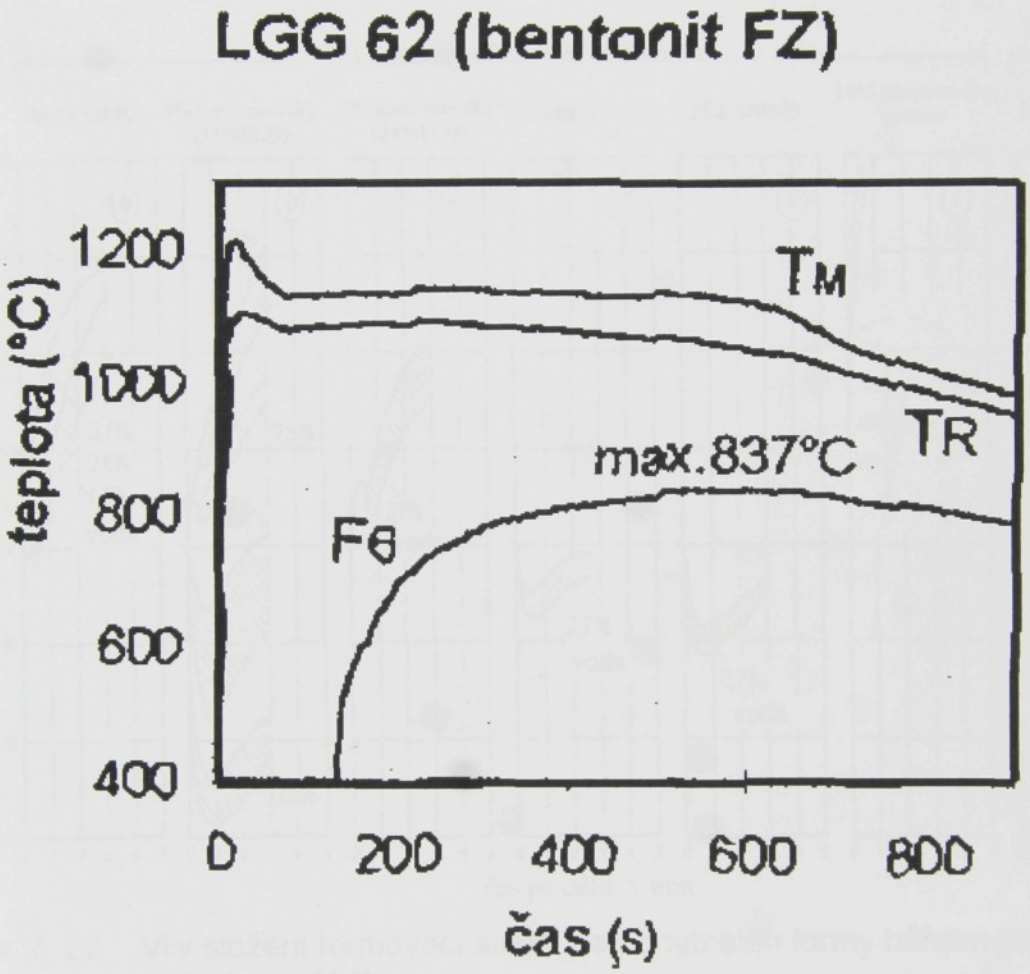
Součinitel tepelné akumulace formy b_f – pevnost formy spolu se součinitelem tepelné akumulace jsou rozhodujícím činitelem při grafitizaci, čímž společně ovlivňují homogenitu litinových odlitků. U kovových forem je součinitel b_f vysoký a tím brzdí grafitizaci. Litina tuhne bíle a dilatace tuhnoucí slitiny má charakter podobný oceli. Vlivem tepelné dilatace probíhá i roztažení forem, především jejich činného povrchu. Hodnoty b_f různých formovacích materiálů uvádějí JELÍNEK a VONDRÁK [17] viz doplněná tabulka č. 2 v kapitole 2.3.3 .

Na základě výsledků zkoušek řady autorů, HOUŠŤ [48], BALINSKIJ, KRINKE, GIRŠOVIČ, HUGHES, SIGERFOOS [5] byl zjištěn větší výskyt staženin a ředin u syrových forem oproti pevnějším CT formám. Pro odstranění ředin u syrových forem doporučují autoři snížit vlhkost a zvýšit pevnost směsi tak, aby spěchovatelnost dosáhla hodnot 35 – 45 %, spolu s použitím plynotvorných látek.

2.4.3.2 Vliv parametrů formy na lineární změny odlitku

Ostřivo slévárenských forem tvoří většinou křemenné písky, které jsou charakteristické tím, že při překročení teploty 573,3 °C prodělávají vratnou změnu modifikace křemene α na β SiO_2 . Až do 700 °C vykazují nespojitou tepelnou roztažnost , nad touto teplotou nastává mírné smrštění a při teplotách nad 900°C dochází k plynulé expanzi při kristobalitické přeměně. Podrobným zkoumáním ohřevu formy teplem uvolněným z tuhnoucího odlitku, výpočtem, numerickou simulací a měřením GEDEONOVÁ [6]

i jiní autoři potvrdili, že již u malých odlitků (válec o průměru 44 x 100 mm s objemem 0,44 dm3 a modulem 1,36 cm) dochází k významnému ohřevu líce formy nad teplotu alotropické přeměny α- β SiO2 až do oblasti kristobalitu spolu se zvětšením objemu. Po vyčerpání úplné spěchovatelnosti směsi, během tepelné dilatace křemene, způsobuje tato dilatace okamžitý nárůst tlakových napětí v povrchových vrstvách formy. Celková hodnota dilatace formy závisí i na ostatních parametrech formy a přímo ovlivňuje i dilataci odlitku během tuhnutí.
Při provedených zkouškách naměřila GEDEONOVÁ v místě 6 mm pod povrchem formy max. teplota 837 °C za 580 s. Tento průběh teplot v prohřáté vrstvě, viz obrázek č. 26, se významně odráží v tepelné dilataci ostřiva, což má podle autorky významný vliv na lineární změny odlitku.

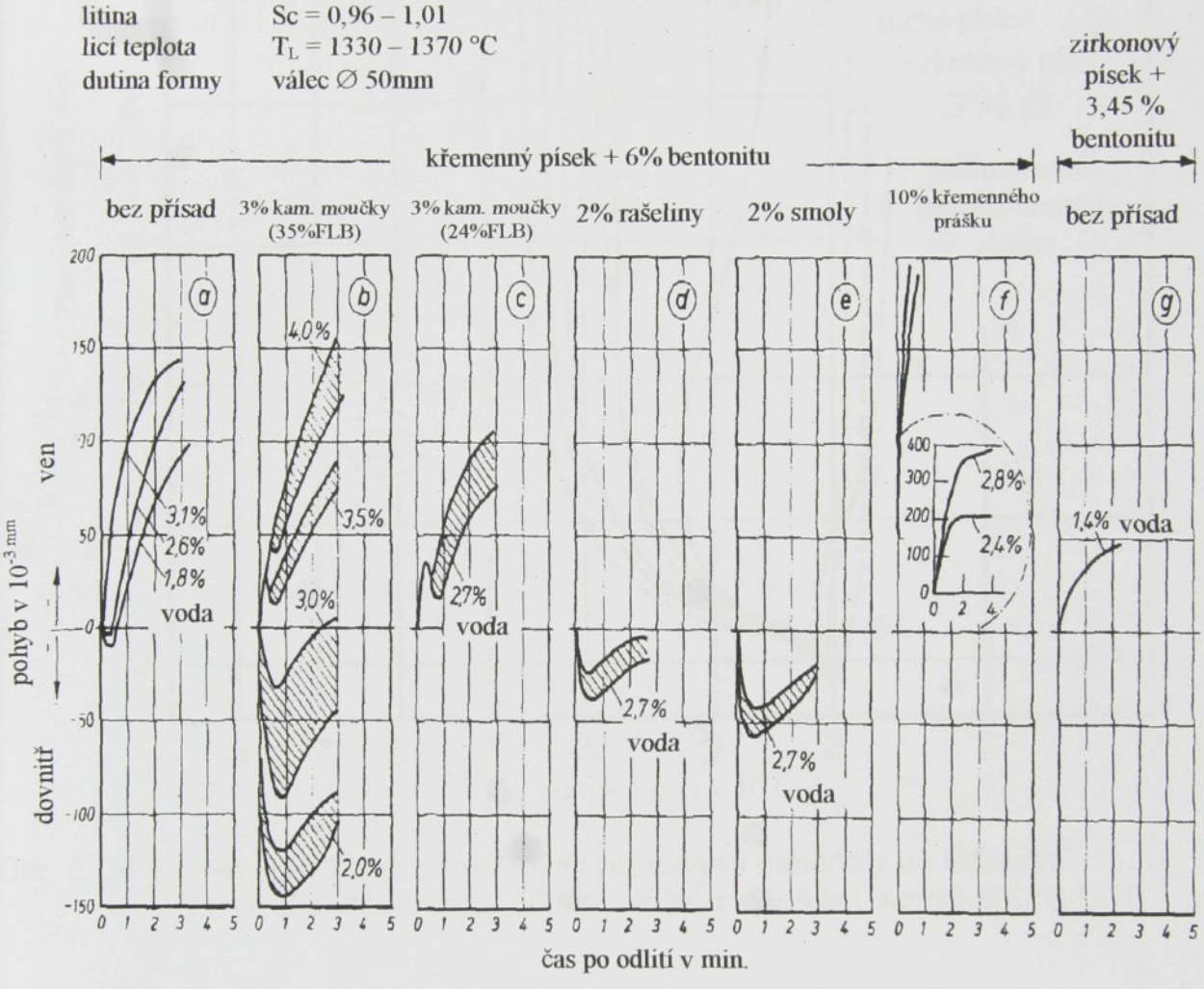


Obrázek č. 26 Časový průběh teplot v odlitku a ve stěně formy při zkouškách s LGG. /6/

Při použití tepelně stabilizovaného ostřiva (např. šamotové drti) se neprojevuje významně ani tzv. samodopěchování ani tlakové pnutí v povrchových vrstvách formy, čímž forma nepůsobí na rozměrové změny odlitku. [6]

Děje probíhající v pískové formě po zalití taveninou studovali i BOENISCH a kol. [13,14] či KÖHLER [47]. Voda v zahřáté povrchové vrstvě formy se odpařuje a kondenzuje ve vzdálenějších a chladnějších vrstvách. Vytváří se kondenzační zóna, která je podle počátečního obsahu vlhkosti formovací hmoty více či méně měkká a schopná zhutnění, současně se vznikem tlakového napětí způsobeného nárůstem objemu ostřiva. Proti tomu působí vysychání pojivových můstků smršťování a tím kontrakci vazby zrn.

Vzhledem k převaze tlakového napětí, během tuhnutí odlitku, se dutina formy roztahuje a zvětšuje tak původní objem. Podle podmínek odlévání může počáteční pohyb stěny formy a kovu probíhat různě rychle i v opačném směru. Rozměry a doba pohybů podmíněných formovací hmotou jsou podle BOENISCHE ovlivňovány především licí teplotou, složením formovací směsi, tvarem odlitku a jeho velikostí. Vliv různých parametrů formovací směsi na pohyb stěny v průběhu odlévání a po naplnění formy je znázorněn na obrázku č. 27. Čáry jsou naměřené křivky pohybu a šrafovaná pole udávají dosah rozptylu, ve kterém ještě mohou křivky pohybu písku ležet.

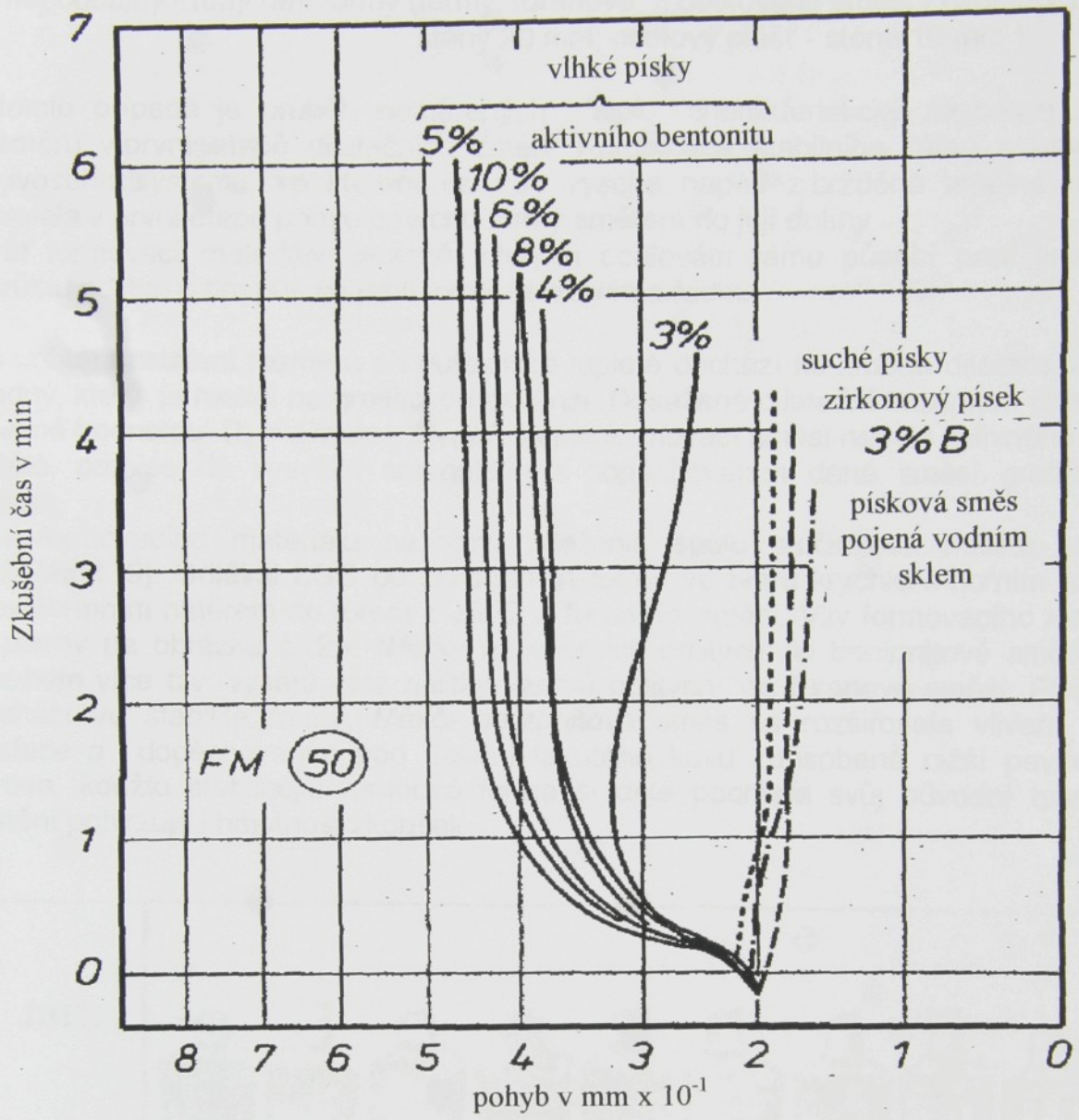


Obr. č. 27 Vliv složení formovací směsi na pohyb stěn formy během plnění a po odlití formy [14]

2.4.3.3 Vliv tuhosti formy a pojivového systému

Zkoušky s různým obsahem bentonitu ve formovací směsi (vedle zkoušek s ostatními přísadami při odlévání různých kovů – Pb, Al, Cu, LGG) provedl a vyhodnotil BOENISCH [12]. Průběhy pohybu stěn forem s obsahem 3 – 10 % bentonitu ve formovací směsi, 3 % bentonitu v zirkonovém písku, ve směsi pojené vodním sklem a ve vysušené směsi po odlití Al s licí teplotou 900°C jsou zobrazeny na obrázku č. 28. [12]

Na základě naměřených průběhů lineárních změn odlitků vyvozuje GEDEONOVÁ [6] závěr, že výrazný vliv formy na daný průběh má tuhost pláště – rámu formy.



Obr. č. 28 Pohyb stěn forem s rozdílnými pojivovými materiály při odlévání válcové zkoušky průměr 50 mm, odlité z Al při licí teplotě 900°C [12]

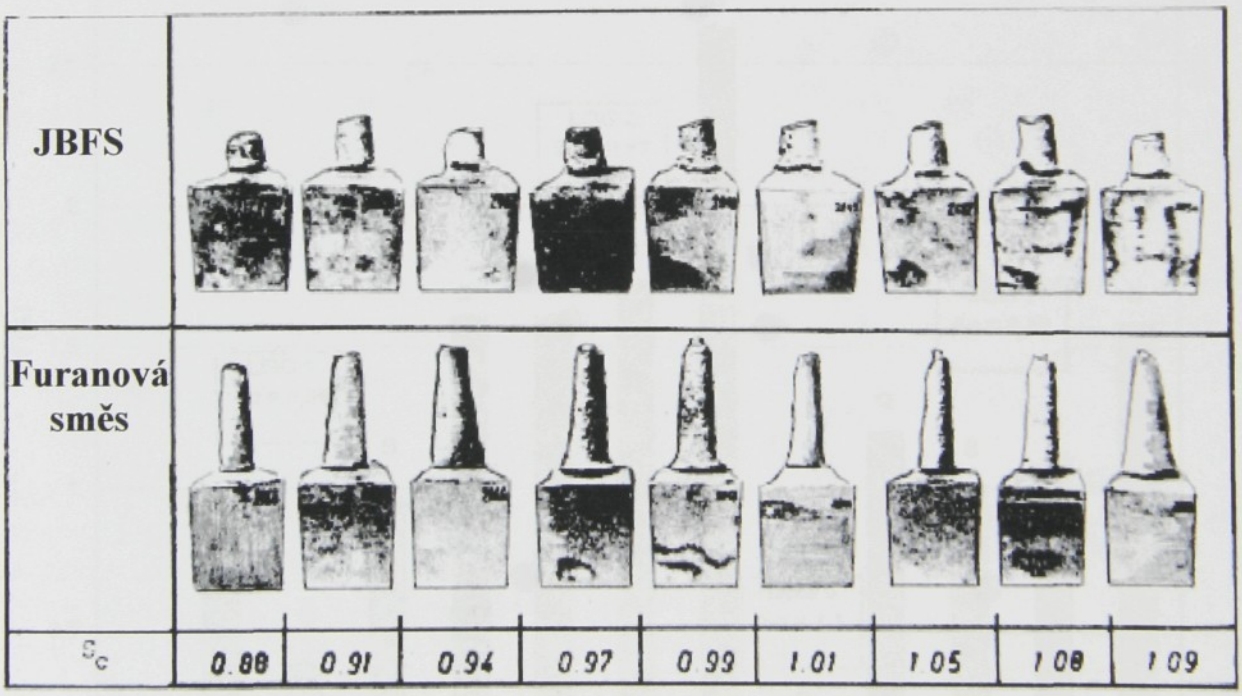
a) *poddajný rám formy* (bentonitová formovací směs v tenkém plechovém rámu).

Při použití všech typů ostřiv a pojivových systémů byla v prvních 100 s zjištěna pouze kladná lineární změna, jako důsledek mikrodilatace a vzniku tlakových napětí v přehřátých povrchových vrstvách formy, a to při tuhnutí LGG i LLG.
Vyklenutí těchto vrstev do stěny formy je způsobeno dilatací ostřiva, poddajnosti pojivového systému a přítomností kondenzační zóny. Po prvním maximu nastává ustálení či mírné změny, což dokumentuje určité ustálení procesů ve stěně formy.
Po dosažení eutektické teploty následovala třetí etapa s výrazným a vždy kladným nárůstem lineárního rozměru vyvolaným grafitickou expanzí v odlitku. Maximální lineární přírůstek zjistili GEDEONOVÁ [6] i DÚL [7] na konci eutektické výdrže s následujícím pozvolným zmenšováním měřeného rozměru.
U furanového pojivového systému se nepotvrdila domněnka o kladení odporu proti první i druhé (grafitizační) expanzi . Autorka spojuje tato zjištění s převládajícím vlivem bentonitové formy, ve které je furanová forma jako nepravé jádro o síle stěny 20 mm.

b) *nepoddajný - tuhý rám formy* (formy: furanové, z obalované směsi - Croning, tloušťka stěny 20 mm, ocelový plášť - stěna 10 mm).

V tomto případě je průběh naměřených křivek charakteristický zápornou změnou rozměru v první etapě dilatačních změn. Kombinace stabilního rámu a pevnějšího pojivového systému, ve kterém vzniká vysoké napětí z brzděné tepelné dilatace, vyvolala v první etapě pohyb povrchu formy směrem do její dutiny.
Tyto formovací materiály uložené v tuhém ocelovém rámu působí proti lineárnímu nárůstu odlitku a tím působí proti vzniku staženin a ředin.

Po určitém ustálení rozměrů při eutektické teplotě dochází ke změně dilatace ve směr kladný, který je reakcí na grafitickou expanzi. Dosažené dilatační maximum charakterizované hodnotou $D_2 = Dmax - D_{11}$ při stejné formovací směsi nebylo ovlivněno tuhostí pláště, což se dá vysvětlit srovnatelným dopěchováním dané směsi grafitizačním tlakem.
Vliv formovacího materiálu na vznik staženin spolu s účinností nálitku studoval HUMMER [9]. Odléval LGG do zkušebních forem ve tvaru krychle s horním nálitkem s exotermním nátěrem do forem z JBFS a furanové směsi. Vliv formovacího materiálu je patrný na obrázku č. 29. Nálitky na vzorcích odlitých do bentonitové směsi byly mnohem více tzv. vysáté, než nálitky vzorků odlitých do furanové směsi. Příčina se nachází ve stabilitě formy. Měkčí bentonitová směs se rozšiřovala vlivem vlastní dilatace a dopěchováním pod tlakem tekutého kovu způsobené nižší pevností za syrova, kdežto stabilnější furanová forma si déle podržela svůj původní tvar. Toto zjištění potvrzuje i hmotnost zkoušek



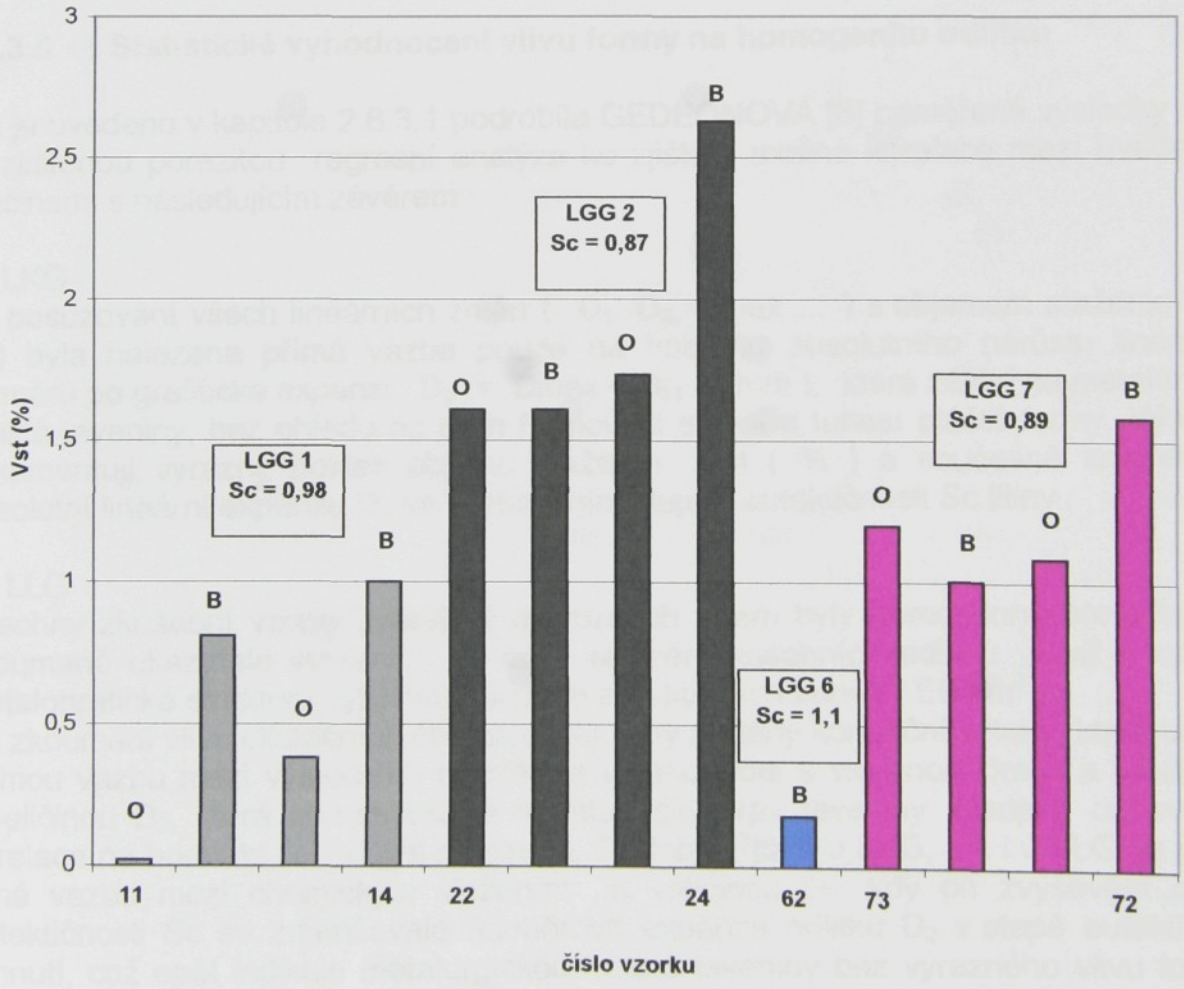
Obr. č. 29 Zkušební odlitky ve tvaru krychle s rozdílnou úrovní dosazovacích nálitků odlévaných do bentonitových JBFS a furanových forem s chemickým složením Sc v intervalu od 0,88 do 1,09 [9]

odlévaných do bentonitových forem, která je ve shodě se zřetelně nízkou výškou nálitku oproti hmotnostem zkoušek odlévaných do forem furanových, jak je z obrázku č. 29 patrné. Ten také dále dokazuje, že chemické složení litiny, charakterizované stupněm eutektičnosti od 0,88 do 1,09 má menší význam než stabilita formy.

2.4.3.4 Vliv druhu ostřiva

Molochit – formovací směsi s tímto ostřivem se během experimentu chovaly jako tepelně stabilizované a naměřené dilatace v první etapě do grafitické expanze byly nulové nebo se kolem nuly pohybovaly. V druhé, eutektické etapě, byl zaznamenán výrazný nárůst měřeného rozměru D_2 (hodnota absolutního nárůstu lineárního rozměru po grafitické expanzi) přesahující hodnoty zjištěné u zkoušek s ostatními ostřivy. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena sníženou pevností směsi v důsledku nepříznivého tvaru zrn s vysokou hranatostí umožňující značné dopěchování směsi. Z těchto důvodů GEDEONOVÁ [6] molochitové ostřivo do jednotných formovacích směsí nedoporučuje.

Křemenná ostřiva - (*Šajdíkovy Humence- ŠH* a *Kisors* s Resonalem)
Směsi s oběma písky, použité jako nepravé jádro při zkouškách s poddajným pláštěm z JBFS, vykazovaly srovnatelné průběhy dilatací.
V tuhém rámu s 10 mm ocelovým plechem projevil písek *ŠH* výraznější zápornou hodnotu dilatace než písek *Kisors* , což dokumentuje vznik většího napětí ve formě v důsledku kulatého tvaru zrn a rovnoměrnější zrnitosti. V druhé etapě za působení grafitizačního tlaku umožňuje *Kisors* oproti *ŠH* větší dopěchování a tím větší nárůst měřeného rozměru zkušebního odlitku, což podle GEDEONOVÉ opět souvisí s větší hranatostí a nerovnoměrností zrn *Kisorského* písku.



Obr. č. 30 Vliv druhu formy a stupně eutektičnosti Sc LGG na náchylnost ke staženinám Vst (%),(B - bentonitový plášť z JFS, O - ocelový plášť)[6]

Obalovaná ostřiva - (typ *Croning – Csepel, Huttenes, OFAG*)
Největší délkové změny byly zjištěny u obalované směsi Csepel a to bez ohledu na pevnost rámu. Přehřátí kulatých zrn vyvolalo vysoké napětí ve směsi , což vedlo k výrazné kladné dilataci v první etapě. Nárůst ve druhé etapě se vysvětluje jako dopěchování směsi v důsledku skladby písku z více frakcí.
Menší odchylky vykázala směs Huttenes , která je charakteristická kulatým zrnem a rovnoměrnou granometrií bez výrazného množství prachových částic písku. Rovnoměrná a kvalitní obálka pojiva na povrchu zrna pravděpodobně zapříčinila vyšší pevnost směsi během tuhnutí a grafitizace a tím i menší délkové změny měřeného rozměru.
Obalová směs OFAG, kterou tvoří jemná a oblá zrna s nerovnoměrnou granulometrií vykazovala vlivem menšího pnutí menší nárůst v první etapě, než u ostatních směsí v druhé etapě. Tam byl zaznamenán výrazný nárůst při grafitické expanzi v rámci výrazného dopěchování směsi vlivem uvedené nerovnoměrné granulometrie pískových zrn.

Zjištěné výsledky spolu s porovnáním jednotlivých směsí jsou uvedeny na obrázku č. 30, který vyhodnocuje velikost objemových staženin ve vzorcích z LGG s rozdílným chemickým složením, viz. Sc (ve vzorcích z LLG se staženiny nevyskytovaly). Ze sloupcových grafů je patrné, že tuhost pláště – rámu formy má výrazný vliv na výskyt staženin v odlitcích. Vliv druhu formovací směsi (pojivový systém a typ ostřiva) se na velikosti staženin u těchto netrvalých forem prakticky neprojevil. [6]

2.4.3.5 Statistické vyhodnocení vlivu formy na homogenitu odlitku

Jak je uvedeno v kapitole 2.6.3.1 podrobila GEDEONOVÁ [6] naměřené výsledky spolu se zjištěnou porezitou regresní analýze ke zjištění možné korelace mezi uvedenými veličinami s následujícím závěrem :

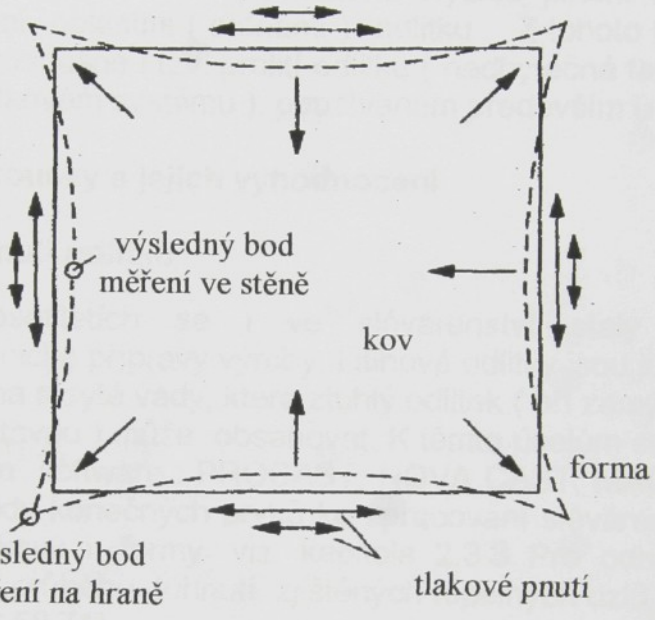
a) LKG
Při posuzování všech lineárních změn (D_1, D_2, Dmax ...) s objemem staženin Vst (%) byla nalezena přímá vazba pouze na hodnotu absolutního nárůstu lineárního rozměru po grafitické expanzi D_2 = Dmax – D_{11} (mm), která závisí na metalurgické kvalitě taveniny, bez ohledu na druh formovací směsi a tuhost pláště formy. Výsledky dokumentují výrazný pokles objemu staženin Vst (%) a současně zmenšování absolutní lineární expanze D_2 se zvyšováním stupně eutektičnosti Sc litiny .

b) LLG
Všechny zkušební vzorky odlévané do různých forem byly homogenní, proto byly za zkoumané ukazatele vybrány : konečný rozměr zkušebních odlitků Dodl (mm) a metalografická struktura vyjádřená počtem eutektických buněk (EB/cm^2).
Při zkoumání vlivu dilatačních charakteristik byly zjištěny korelační vztahy, které udávají přímou vazbu mezi výsledným rozměrem odlitku Dodl s veličinou Dmax a především s veličinou D_2, která charakterizuje metalurgický stav taveniny. Naopak odpovídající korelace na hodnotu D_1 nabyla nalezena. Obdobně, jako u LKG, tak i u LLG, je patrná silná vazba mezi chemickým složením a veličinou D_2, kdy při zvyšování stupně eutektičnosti Sc se zmenšovala rozměrová expanze odlitku D_2 v etapě eutektického tuhnutí, což opět indikuje metalurgickou kvalitu taveniny bez výrazného vlivu formy a jejího pláště. Při vyšších hodnotách Sc byly dosaženy menší konečné rozměry odlitků Dodl.

2.5 Vliv technologických parametrů na vznik vady

2.5.1 Vliv konstrukce odlitku (technologie výroby odlitku)

Vznik tepelného uzlu často předurčuje již konstrukce odlitku , nebo je dán technologií výroby odlitku volbou dělící roviny , vtokové soustavy , konstrukcí jádra , typem jádrové či formovací směsi. Viz další kapitoly.
Vlivem konstrukce (tvarem) odlitku společně s dilatací stěny formy se zabýval BOENISCH [13]. Obrázek č. 31 znázorňuje schématické rozložení napětí na povrchu formy způsobující deformaci odlitku. Autor zjistil, že výsledná velikost staženin či ředin závisí také na poměru konvexních a konkávních tvarů odlitku.



Obr. č. 31 Vektory tlakového napětí a směry pohybu stěn formy při prismatickém tvaru odlitku [13]

2.5.2 Nálitkování a chladítka

Negativní vliv konstrukčních tepelných uzlů (křížení stěn, zesílení stěny, zlom stěny . .) se nejčastěji eliminuje nálitkováním. Obecné zásady nálitkování litin, popsané PŘIBYLEM, VONDRÁKEM [3] či ANDERSONEM [45], přecházejí od dříve používané metody vepsaných kružnic (koulí) k současné modulové metodě , která stanoví modul odlitku – M_o a od něho odvozuje modul nálitku – M_n . Při stanovení velikosti nálitku se využívá kvadratický zákon CHVORINOVA , který používá modul odlitku pro výpočet doby tuhnutí a z ní je možno odvodit dobu tuhnutí nálitku. Obdobným způsobem dimenzuje velikost nálitku i HUMMER [9], který vychází ze stability formy, hmotnosti zbytku nálitku, hmotnosti odlitku a jeho modulu.
Jak je známo, modul odlitku – M_o (m) je definován jako poměr objemu odlitku V_o (m^3) a povrchu odlitku S_o (m^2). V praxi se pro zjednodušení celého výpočtu používají různé typy grafů, tabulek a nomogramů . Nálitek tak má jednoznačně za úkol přesunout tepelný uzel a především jeho negativní vliv na homogenitu odlitku mimo tvary a rozměry odlitku dané výkresovou dokumentací .
Opakem nálitkovaní je řešení usměrněného tuhnutí tepelných uzlů pomocí chladítek , což v praxi naráží na řadu výrobních problémů (technologických i organizačních)

uvedených již v úvodu. Zde je důležité vypočítat optimální tepelnou kapacitu chladítka, aby nedocházelo k jeho natavování, nebo k ovlivňování tuhnutí taveniny podle metastabilního diagramu .

2.5.3 Vtokové soustavy

Volba typu vtokové soustavy (jednořadá ,víceřadá , podtlaková , přetlaková) spolu se zaústěním do odlitku (typ zářezu , místo zaústění) může do značné míry ovlivnit vznik tepelného uzlu a s ním spojené vady odlitku. Pokud konstrukce odlitku a výrobní technologie neumožňuje jinak, než zaústění malého počtu vtoků do silné stěny odlitku, vkládá se před zářezy vtoků nálitek, který tak tvoří součást vtokové soustavy. Ta by měla být navržena vždy s ohledem na co nejrychlejší zaplnění dutiny formy taveninou při jejím minimálním mechanickém poškození. Rychlé plnění minimalizuje teplotní rozdíly mezi jednotlivými oblastmi (stěnami) odlitku . Z tohoto hlediska se ve starší literatuře uvádí, jako prospěšné i tzv. prolití odlitku (nadbytečná tavenina se zadržuje v předimenzovaném nálitkovém systému), používaném především u kusové výroby . [3]

2.6 Používané zkoušky a jejich vyhodnocení

2.6.1 Simulace tuhnutí odlitků

V posledních dvou desetiletích se i ve slévárenství staly simulační metody nedílnou součástí technické přípravy výroby. Litinové odlitky jsou již v příravném stádiu zkoumány především na skryté vady, které ztuhlý odlitek (při zamýšleném zavtokování spolu s nálitkovou soustavou) může obsahovat. K těmto účelům se používá výpočetní technika se speciálním software : PROCAST, NOVA CAST, MAGMASOFT, SIMTEC atd.,který využívá metody konečných prvků ke zpracování slévárenských fyzikálně – materiálových veličin kovu i formy viz kapitola 2.3.3. Pro odhalení vnitřních vad odlitků se vychází z průběhu tuhnutí zjištěných tepelných uzlů, dosud bez aplikace dilatačních dějů . [29,56,58,71]

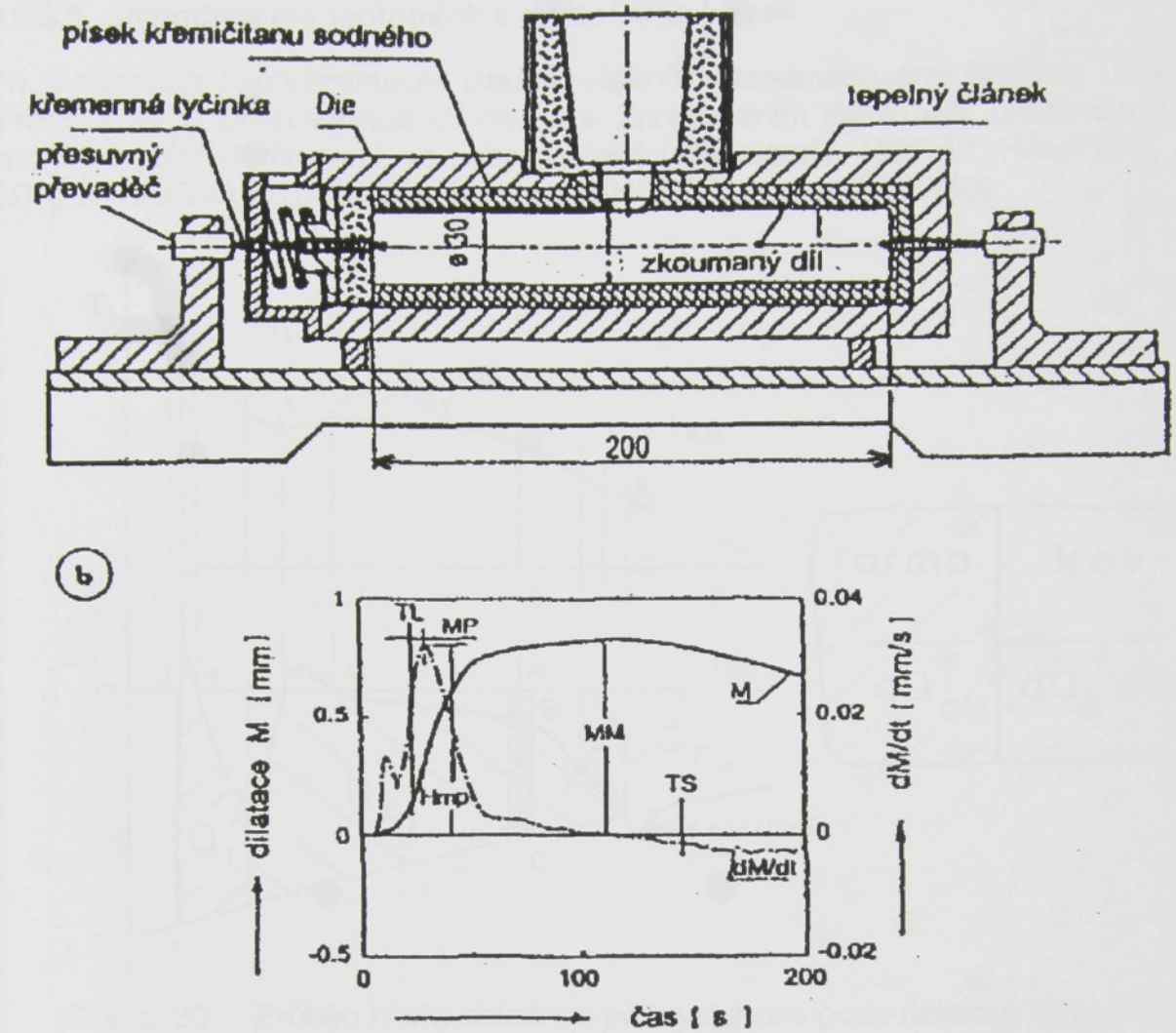
2.6.2 Zkušební odlitky

Zkušební tělesa rozdělujeme konstrukčně podle sklonu ke vzniku vad
a k vyhodnocení průběhu sledovaných dějů :

a) Zkušební tělesa ke zjišťování vad soustředěných – staženin.
K měření sklonu litiny k tvorbě staženin byla navržena řada zkušebních těles z nichž nejvýznamnější jsou podle WITMOSERA, BRADÍKA, WALLACE [5], PIWOWARSKÉHO [39], CZIKELA [33], NANDORIHO a HUMMERA [9] atd. Společným znakem těchto těles je jejich konstrukce, která vyvolává výrazné usměrněné tuhnutí s výsledkem koncentrované staženiny, jejíž objem lze relativně přesně změřit vhodnou kapalinou.

b) Zkušební tělesa ke zjišťování vad rozptýlených – ředin.
Vzhledem k tomu, že vady rozptýlené jsou často součástí vad soustředěných, používají se i pro studium vzniku ředin některé výše uvedené zkoušky. Jednu ze speciálních zkoušek tvoří konstrukce se středním tepelným uzlem u odlitku tvaru obráceného T, PAVLIK [5]. Častý výskyt této vady je také u odlitků rotačních, jako například u brzdových bubnů, kotoučů, setrvačníků atd.

c) Zkušební tělesa ke zjišťování dějů probíhajících v soustavě forma – kov.
V roce 1993 navrhl FRASETAL [10] novou sestavu pro tepelnou analýzu. Nazval ji FOURIEROVOU termoanalýzou viz obrázek č. 32.



Obr. č. 32 Pomocí diferenciální analýzy dilatační křivky M = f (t) je také možno předpovědět kinetiku tuhnutí litin [10]
obr.a- ukazuje konstrukci měřidla,
obr.b- parametry užívané pro vyhodnocení :
MP – derivace hlavního vrcholu v relaci k TL, před kladným TL v s
Hmp – derivace hodnoty hlavního vrcholu v mm/s
MM – hodnota max. dilatace v mm
TL – teplota taveniny u vestavěného termočlánku
TM – max. teplota u termočlánku

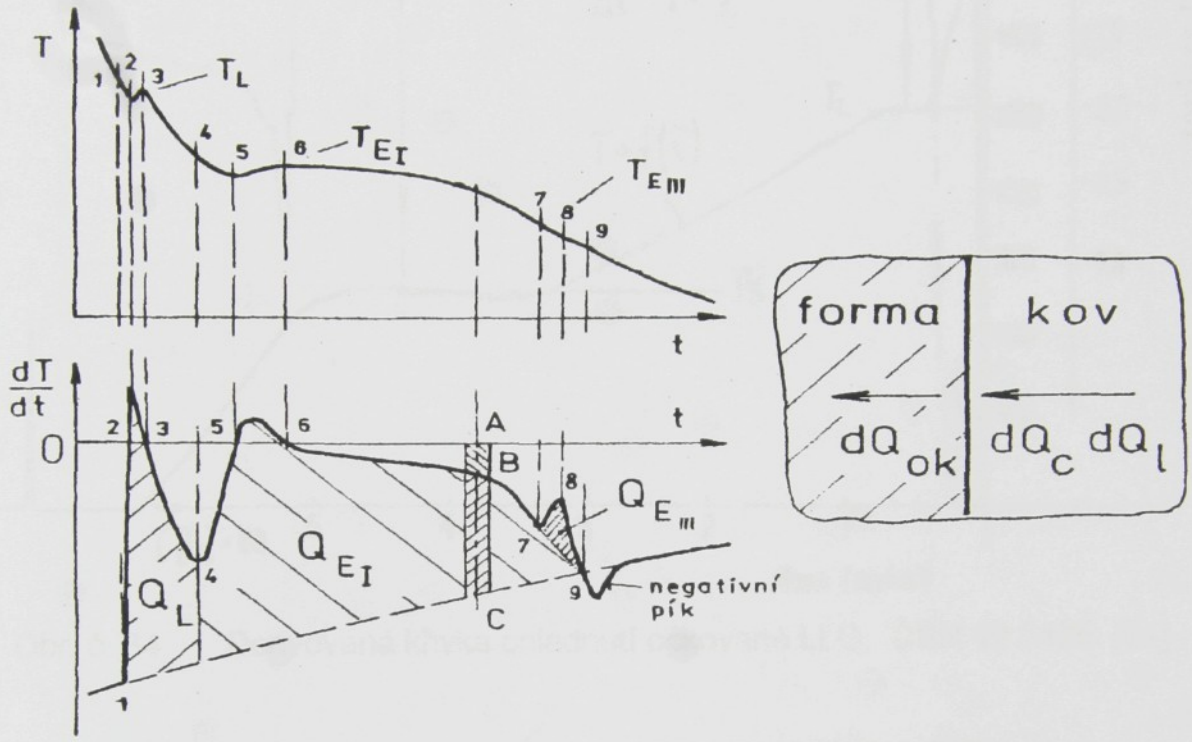
Zařízení pracuje následovně:
- přenos tepla se děje převážně vedením v systému tavenina – stěna formy.
- teplotní průběh ve válcovém zkušebním tělese po odlití je možno vypočítat s ohledem na vnitřní zdroj tepla (tj. uvolněné teplo taveniny), je-li znám časový průběh teploty ve dvou měřených bodech.

Je třeba zkušební těleso se dvěma tepelnými články v definované vzdálenosti. Pomocí teplotního gradientu se vypočte průběh uvolněného latentního tepla v časovém intervalu tuhnutí q = f (t) a z toho podíl tuhá fáze – tavenina při průběhu tuhnutí. Ten popisuje i zjištěná dilatační křivka, z níž lze, podle WOLFA [10], předpovídat kinetiku tuhnutí (sklon k tvorbě karbidů, morfologie grafitu, množství feritu atd.).

2.6.3 Metody vyhodnocení naměřených výsledků

2.6.3.1 Vyhodnocení teplotních a dilatačních křivek

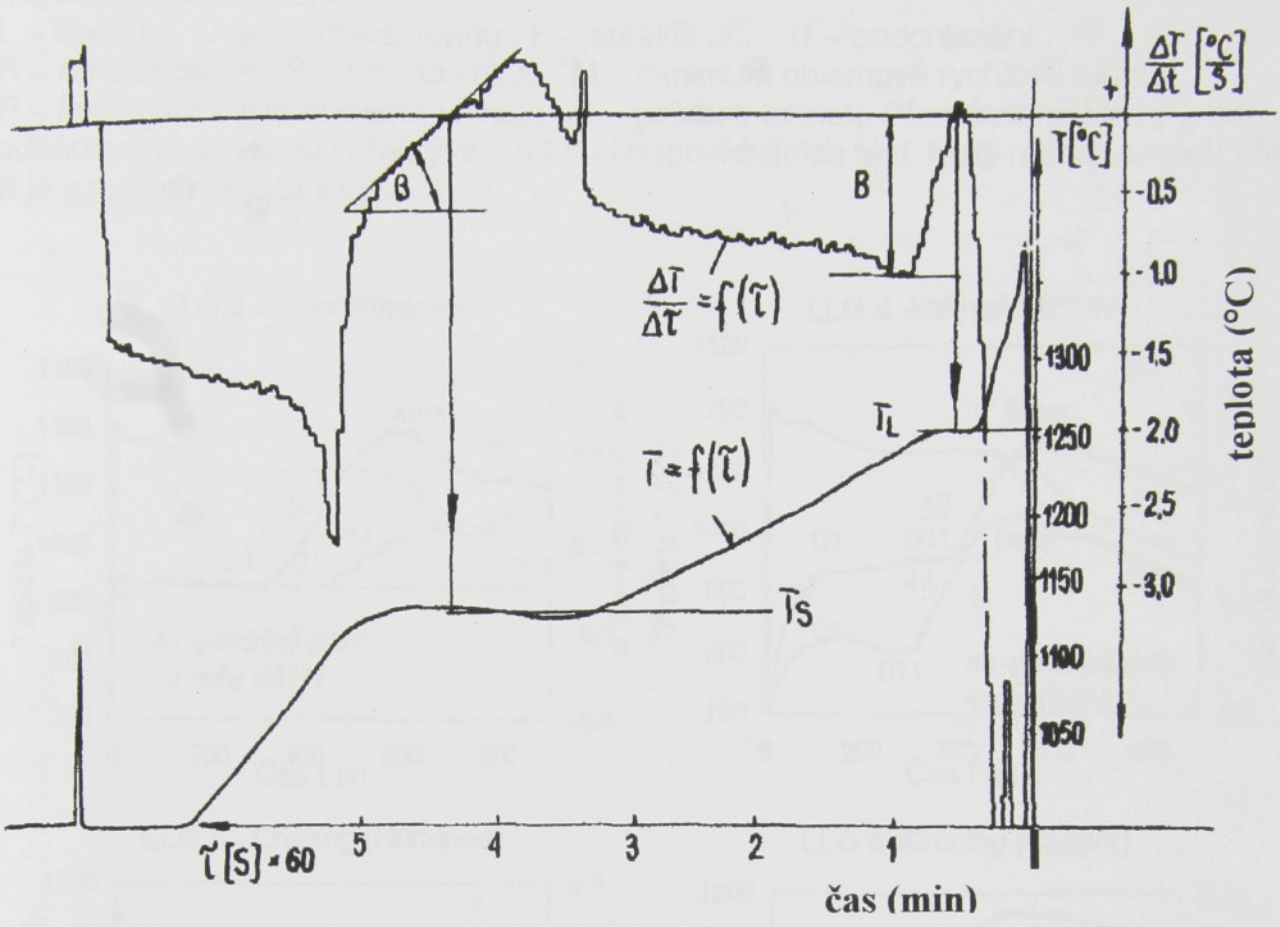
Při uvedených experimentech jsou současně zaznamenávány hodnoty teplotních a rozměrových změn v závislosti na čase. Zpracováním těchto dat, především teplotní analýzy a jejími derivacemi, se zabývala celá řada autorů : HORÁK, HÁLA [50], JURA, BOREK, SAKWA [51], HRIBOVSEK, MARINCEK [52], ROUČKA [40].



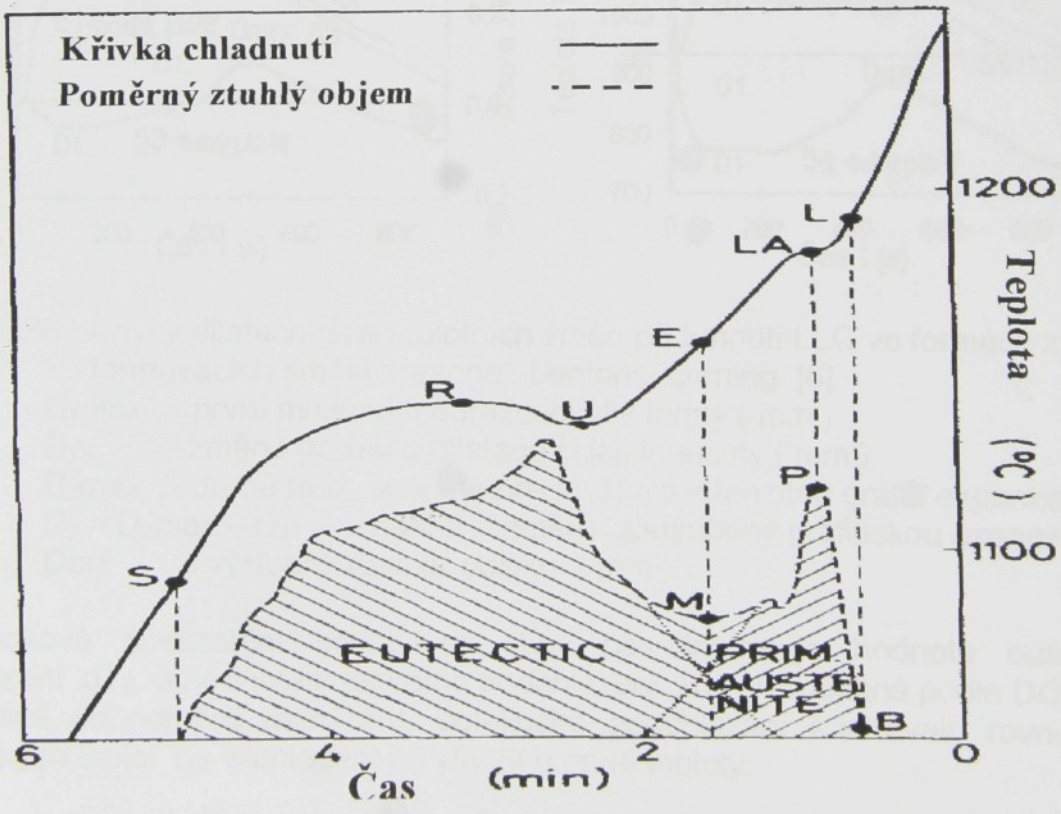
Obr. č. 33 Průběh křivky chladnutí při krystalizaci podeutektické litiny [40]
1 - nukleace primární fáze - $T_{L\,rov}$
2 - teplota minimu na likvidu - T_{PL}
3 - teplota růstu primární fáze, označovaná jako teplota likvidu - T_L
4 - teplota nukleace binárního eutektika – T_N
5 - teplota eutektického minima - T_{PE}
6 - teplota růstu binárního eutektika, označovaná jako T_E – eutektická
7 - teplota nukleace vícesložkového eutektika – $T_{N\,III}$
8 - teplota růstu vícesložkového eutektika - $T_{E\,III}$
9 - teplota konce tuhnutí, označovaná jako teplota solidu – T_S

Proces krystalizace litin je charakterizován teplotami – etapami nukleace a růstu jednotlivých fází: primární, grafitického eutektika a dalších kompexních eutektik. Průběh křivky chladnutí podeutektické litiny s vyznačenými mezními teplotami je zobrazen na obrázku č. 33. Obrázek je doplněn o množství a průběh latentního tepla uvolněného při krystalizaci podeutektické litiny, které odpovídá ploše mezi derivací křivky chladnutí a nulovou linií v intervalu krystalizace, viz ROUČKA [40].

Na obrázku č.34 je zobrazena křivka ochlazování stabilně tuhnoucí očkované litiny a její první derivace viz JURA, BOREK a SAKWA [51]. Druhou derivací lze vypočítat (dle krystalizačních tepel austenitu a grafitu) množství vylučujících se fází. Na křivce lze pomocí derivací přesně určit kritické teploty při přechodu z fáze tekuté do pevné. [35] Výpočtem objemové rychlosti tuhnutí podeutektické litiny se zaměřením na jednotlivé vznikající fáze se zabýval HRIBOVSEK a MARINCEK [52] viz obr. č. 35.

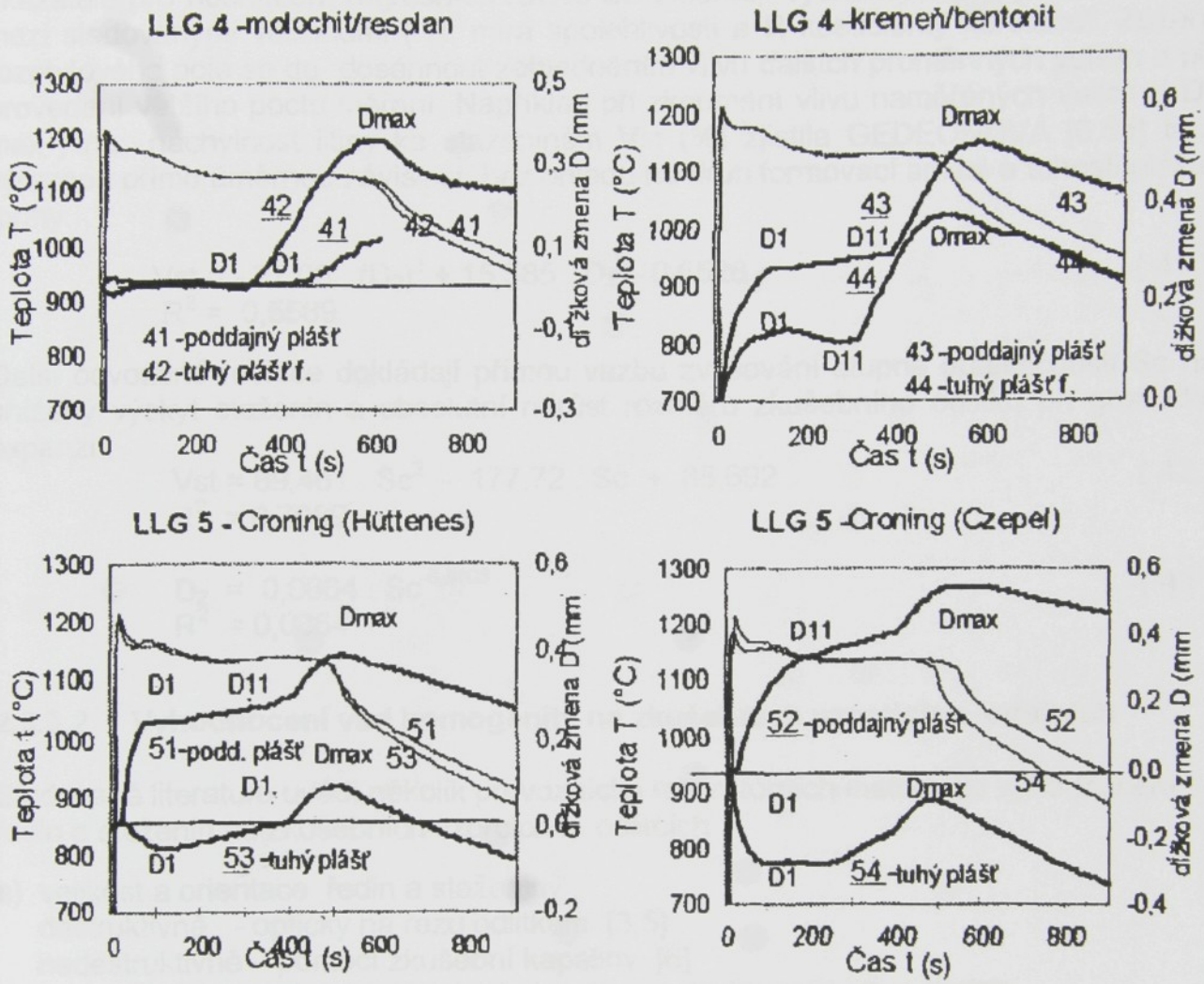


Obr. č. 34 Derivovaná křivka chladnutí očkované LLG, ČSN 42 2425 [51]



Obr. č. 35 Grafický záznam výpočtu objemové rychlosti tuhnutí podeutektické LLG [52]

Legenda k obrázku č. 35 :
L – likvidus , LA – prodleva likvidu , E – eutektikum , U – podchlazení ,
R – rekalescence , S – teplota solidu , M – minimum objemové rychlosti tuhnutí ,
P – maximum austenitického vrcholu , B – počátek tuhnutí. Přerušované křivky jsou odhadované a vykazují překrývání tuhnutí odpovídajících fází. Malý rozsah tuhnutí před B je v mezích nejistoty výpočtu.



Obr. č. 36 Křivky dilatačních a teplotních změn při tuhnutí LLG ve formách z různých formovacích směsí : resonal, bentonit, croning [6]

D_1max - první maximum odrážející vliv formy (mm)
D_{11} - změna průběhu dilatace či její intenzity (mm)
D_2max - druhé max. spojené především s intenzitou grafit. expanze (mm)
$D_2 = D_2max - D_{11}$ - nárůst rozměru způsobený grafitickou expanzí (mm)
Dodl - výsledný rozměr odlitku (mm)

O zárodkové grafitizační schopnosti litiny nás informuje hodnota eutektického podchlazení dT_E a hodnota relativního podchlazení RU vypočítaná podle DOPPA [6], který dává do poměru naměřené eutektické podchlazení k intervalu rovnovážných eutektických teplot T_{EI} s ohledem na vliv Si u dané teploty.

$$RU = \frac{dT_E}{T_{EI}} = \frac{T_{ES} - T_{Emin}}{T_{ES} - T_{EM}} \qquad (40)$$

Na křivce lineárních změn měřeného rozměru se vyhodnocují maxima a minima zjištěná na dilatační křivce přímo, nebo pomocí její první derivace podle času, tak jak je patrné na obrázku č. 36. GEDEONOVÁ [6,55].

Vztah mezi kvalitativními parametry odlitku, charakteristickými hodnotami na dilatačních a teplotních křivkách spolu s chemickým složením litiny (Sc) a vlastnostmi formy byl prokazován pomocí metody korelační a regresní analýzy. Dosažené statistické ukazatele pro hodnocení regresních rovnic dokumentují významnost vzájemného vlivu mezi sledovanými veličinami (R^2 míra spolehlivosti a R koeficienty korelace). Zúžení rozptylového pole se dá dosáhnout zohledněním vlivu dalších proměnných veličin a při provedení většího počtu měření. Například při zkoumání vlivu naměřených veličin (D_2 max) na náchylnost litiny ke staženinám Vst (%) zjistila GEDEONOVÁ [6,55] tuto výraznou přímo úměrnou závislost, bez ohledu na druh formovací směsi a tuhosti pláště formy:

$$Vst = -27{,}06 \cdot (D_2)^2 + 15{,}585 \cdot D_2 - 0{,}6526 \qquad (41)$$
$$R^2 = 0{,}5589$$

Další odvozené rovnice dokládají přímou vazbu zvyšování stupně eutektičnosti Sc na snížený výskyt staženin a absolutní nárůst rozměru zkušebního odlitku při grafitické expanzi :

$$Vst = 89{,}461 \cdot Sc^2 - 177{,}72 \cdot Sc + 88{,}692 \qquad (42)$$
$$R^2 = 0{,}7089$$

$$D_2 = 0{,}0864 \cdot Sc^{-6{,}3103} \qquad (43)$$
$$R^2 = 0{,}0864$$

2.6.3.2 Vyhodnocení vad homogenity na zkušebních vzorcích a odlitcích

Studovaná literatura uvádí několik provozních i laboratorních metod pro vyhodnocení ředin a staženin na zkušebních vzorcích a odlitcích :

a) velikost a orientace ředin a staženiny :
   destruktivně - opticky na řezu odlitkem [3,5]
   nedestruktivně – pomocí zkušební kapaliny [6]
   - defektoskopické zkoušky (prozařovací metoda) [59]

b) morfologie povrchu staženiny : - opticky [5]

c) metalografické vyhodnocení na řezu vzorkem v okolí vady :
   kovová matrice - % feritu / perlitu, % karbidů [5,72],
   počet eutektických buněk EB/cm^2 [6]
   síťoví steaditu ... [5]
   grafit - destruktivně - metalograficky, tvar, rozložení, velikost
   - nedestruktivně - pomocí ultrazvukové zkoušky [49]

Závěrem kapitoly lze konstatovat, že studovaná problematika je velmi komplikovaná a uvedené metody zkoumání spolu se všemi uvedenými poznatky v rešeršní části budou využity při řešení vlastních experimentů.

3 Experimentální část

3.1 Metodika experimentální práce

Pro vyhodnocení vlivu podmínek grafitizace litin na homogenitu odlitků byla jako základní zvolena metoda měření průběhu dilatací a teploty při procesu tuhnutí definovaně metalurgicky upravené tekuté litiny ve zkušební formě. V některých případech byly tyto zjištěné výsledky porovnány s kvalitou souběžně odlévaných sériových odlitků. Z důvodů co neobjektivnějších podkladů pro hodnocení sledovaného děje byla provedena doprovodná měření a vyhodnocení : kontrola kvality taveniny po naočkování, metalografický rozbor vzorků, hodnocení homogenity zkušebních i sériových odlitků a další. Vzhledem k velkému souboru výsledků jsou prezentovány pouze ty zkoušky, které jsou typické pro ilustraci metodiky měření a způsobu vyhodnocování či dalšího zpracování.

Pro laboratorní zkoušky byly použity dva typy konstrukčně odlišných zkušebních odlitků. Měření se vzhledem k různým typům tavících agregátů a sekundární metalurgie prováděla ve více slévárnách: TU Liberec, Slévárna Liberec, H.Kyncl Turnov, ČKD Hradec Králové, Metalurgie Rumburk a Slévárna litin ve ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi. Při provozních zkouškách byly použity dva typy odlitků ze sériové výroby ve Slévárně litin ŠKODA AUTO a.s. Jednalo se o odlitky: *brzdový buben* z LLG a *rošt* z LČG, ve kvalitě blízké LKG.

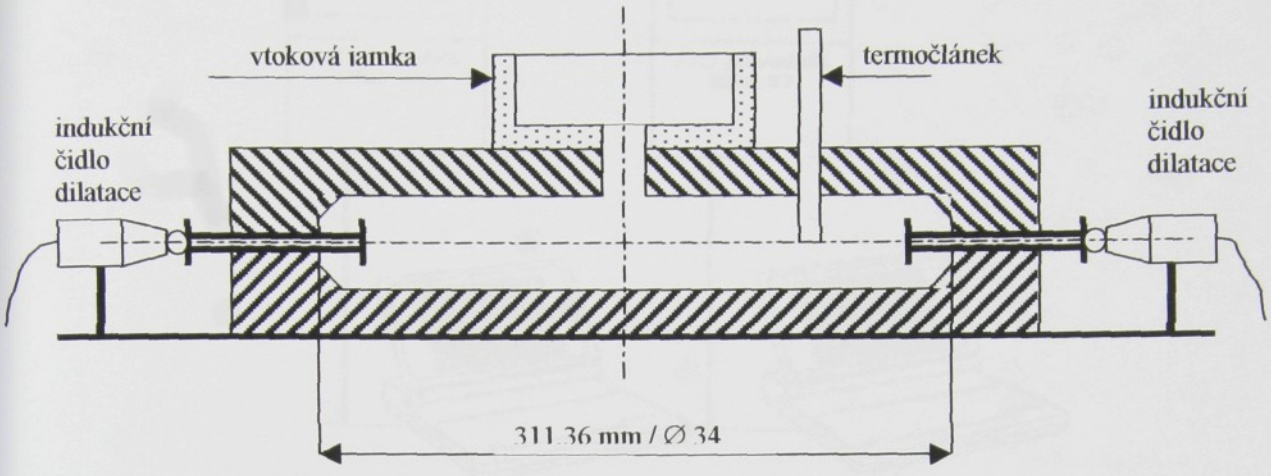
U první skupiny laboratorních zkoušek byly sledované děje snímány v ose zkušebního odlitku *válcové tyče* s dělící rovinou odlitku i formy v horizontální rovině. Po předběžném vyhodnocení získaných výsledků se vzhledem k nedostatkům při dodržení opakovatelnosti výchozích definovaných podmínek formy, spolu se způsobem snímání sledovaných veličin a tvaru dilatační křivky, přistoupilo ke změně konstrukce zkušebního odlitku na typ s jedním výrazným tepelným uzlem – vertikálně zaformovaném válci.
Druhým typem zkušebního odlitku byl *válcový špalek* s vertikální osou, na kterém byla provedena větší část měření a v uvedených případech současně i výroba sériových odlitků. Dilatační děje byly snímány v poloviče výšky zkušebního odlitku v předpokládané ose tepelného uzlu.

3.2 Popis zkušebních těles, měřící aparatury a jejího zapojení

3.2.1 Zkušební odlitek - *válcová tyč* (zkoušky označené indexem T)

První zkoušky byly provedeny na zkušebním odlitku *válcové tyči* o průměru 34 mm a délce 311,36 mm s 5 mm sražením na obou koncích s osou horizontálně zaformovanou. Formu tvořila JBFS v kovovém rámu 350x250x(2x150) mm, ojediněle směs s vodním sklem vytvrzená oxidem uhličitým - CO_2. Upravená slitina byla odlévána pomocí jamky a licího kůlu o průměru 10 mm skrze horní část formy do středu předformovaného odlitku. Na obou koncích dutiny byly v dělící rovině založeny křemenné trubičky cca 80 mm dlouhé, kterými se přenášejí dilatační děje v průběhu tuhnutí a chladnutí na indukční snímače, přichycené na podkladové desce nesoucí rám formy. Tyčky přesahovaly do dutiny formy přibližně o 10 mm.
Teplota byla snímána pomocí termočlánku NiCr-Ni zaformovaného do horní části formy 50 mm od centrálního vtoku. Termočlánek svým koncem zasahoval do osy vzorku , viz obrázek č. 37. Očištěný odlitek spolu se vtokovým kůlem a licí jamkou je na

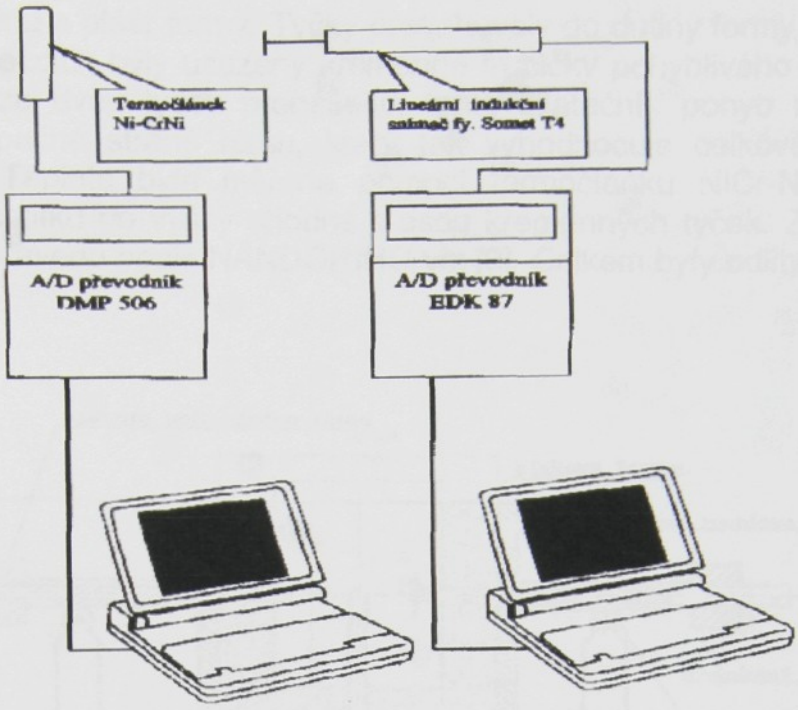
obrázku č. 38. Konstrukce odlitku byla zvolena pro zvýraznění lineárních změn během tuhnutí v podélné ose, kde se vytvoří jednorozměrně výrazný tepelný uzel, který se časem rozpadne na řadu menších dílčích tepelných uzlů. Celá zkušební i měřící aparatura byla sestavena dle vlastní inspirace. Celkem bylo vyhodnoceno 23 zkoušky.



Obr. č. 37 Schéma měření dilatací na horizontálně zaformovaní *válcové tyči.*

Obr. č.38 Očištěný zkušební odlitek válcové tyče s licím kůlem a jamkou.

Oba děje byly sledovány současně dvěma separátními počítači, sjednocenými v čase, viz obrázek č. 39. Snímaná hodnota dilatace byla indukčním snímačem dráhy převedena na analogový signál pomocí A/D převodníku EDK 87, který byl dále přenesen a uložen v PC. Obdobně byla snímána hodnota teploty převedená termočlánkem na veličinu elektrického napětí a pomocí A/D převodníku DMP 506 na analogovou veličinu převedenou a uloženou na druhý PC, viz obrázek č. 40.



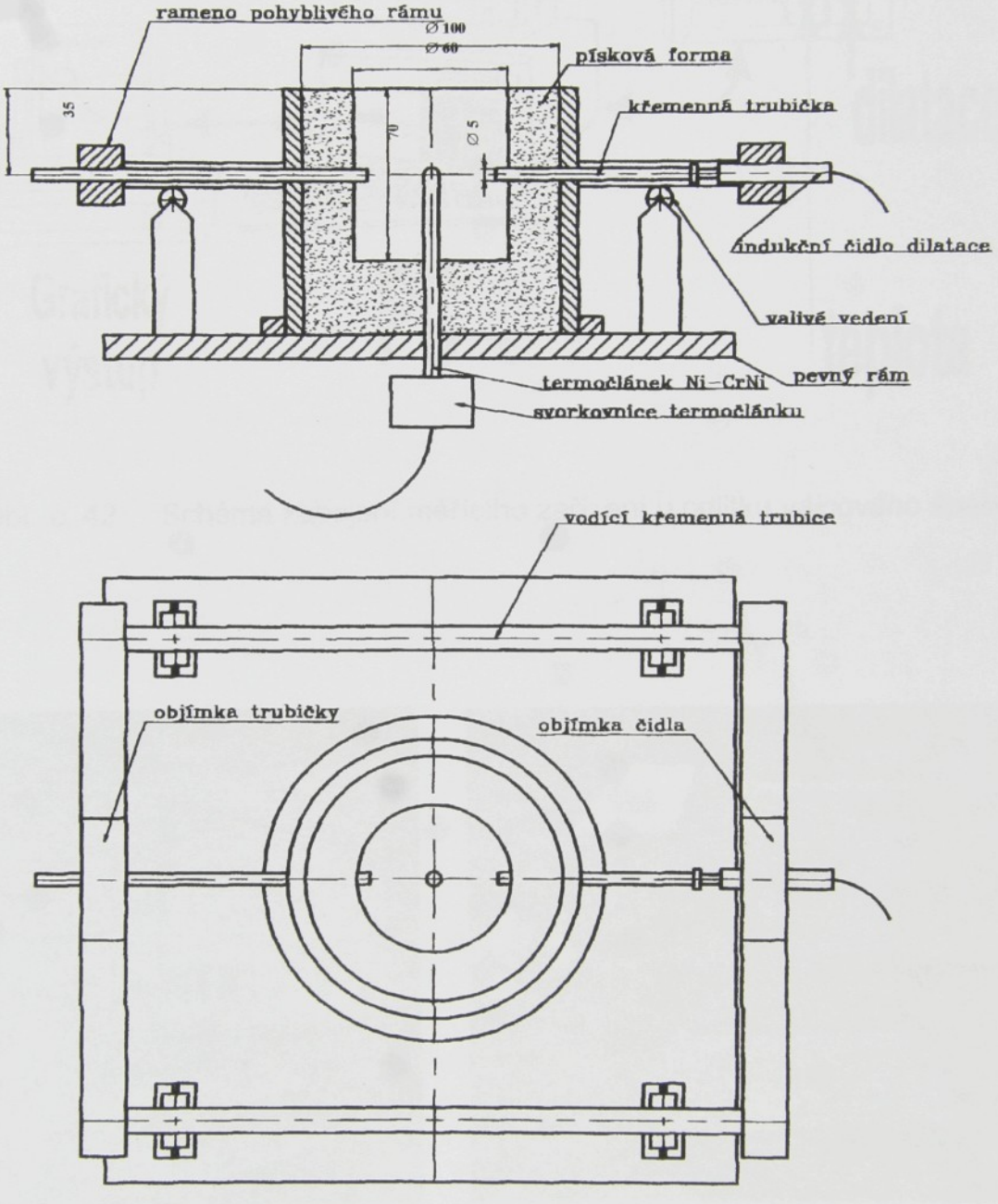
Obr. č. 39 Schéma zapojení měřící aparatury u odlitku *válcové tyče.*

Obr. č. 40 Měřící aparatura pro odlitek *válcové tyče.*

3.2.2 Zkušební odlitek - *válcový špalek* (zkoušky označené indexem Š)

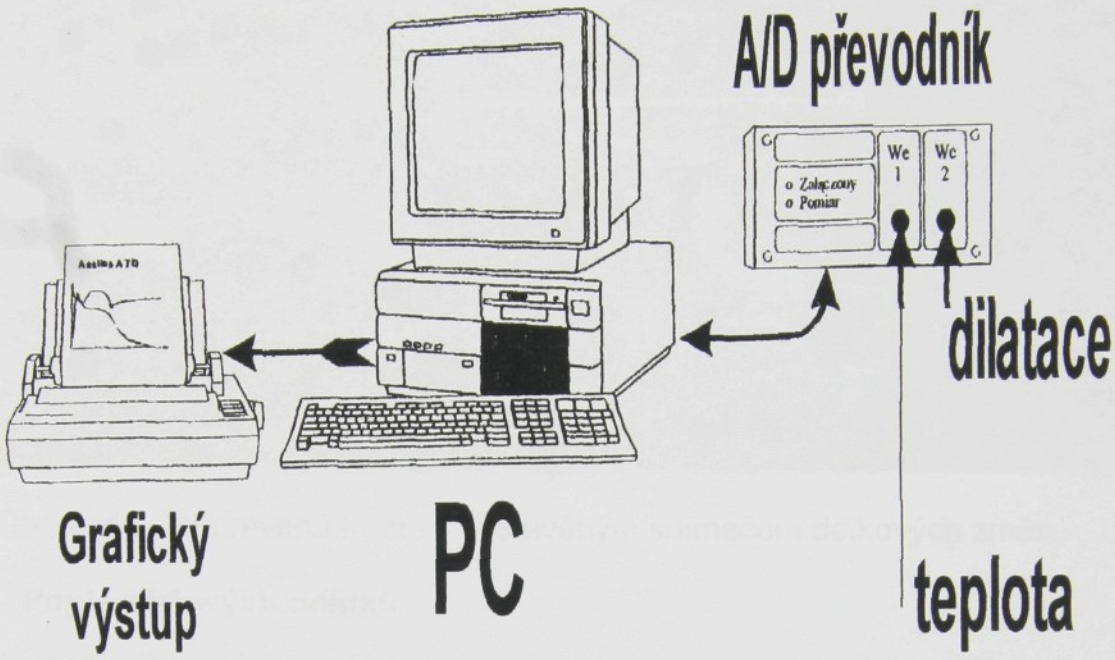
Válcový špalek je zkušební odlitek tvaru válce s vertikální osou o průměru 60 mm, vysoký 70 mm, odlévaný gravitačně shora přímo do dutiny formy. Ta byla vyrobena z formovací směsi s vodním sklem (výjimečně z JBFS, nebo byla použita kokila stejných rozměrů k porovnávacím měřením) a založena do 5 mm silného hliníkového rámu, viz obrázek č. 41. Dilatace zkušebního odlitku byla sledována v horizontální ose v polovině výšky odlitku, opět pomocí dvou křemenných tyček o průměru 6 mm, spojujících dutinu odlitku s indukčním snímačem a křemenno-ocelovým

rámem skrze stěnu a plášť formy. Tyčky přesahovaly do dutiny formy přibližně o 7 mm. Na otočných válečcích byly usazeny křemenné trubičky pohyblivého rámu, na který je fixována jedna ze dvou tyček přenášející tento dilatační pohyb na jediný snímač upevněný na opačné straně rámu, který tak vyhodnocuje celkové délkové změny v měřené ose. Teplota byla měřena pomocí termočlánku NiCr-Ni zaformovaného zespodu v ose odlitku do výšky shodné s osou křemenných tyček. Zkušební a měřící zařízení bylo sestaveno podle NÁNDORIHO viz [9]. Celkem byly odlity 84 vyhodnocené zkoušky.

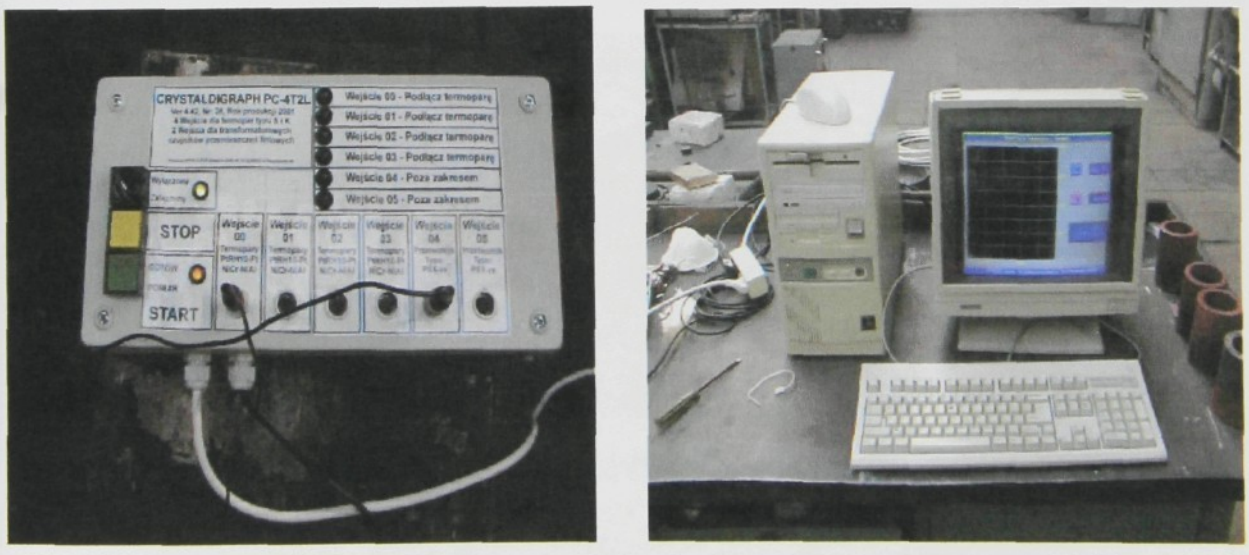


Obr. č. 41 Schéma měření dilatací na vertikálně zaformovaném *válcovém špalku.*

Celkové schéma zapojení je znázorněno na obrázku č. 42. Naměřené hodnoty obou veličin (dilatace,teplota) byly snímány jediným A/D převodníkem PC-2T [66], který předával oba signály najednou jedinému PC, kde se data ukládala a pomocí převodníku je bylo možné dále zpracovat (1. a 2. derivace), viz obrázek č. 43.

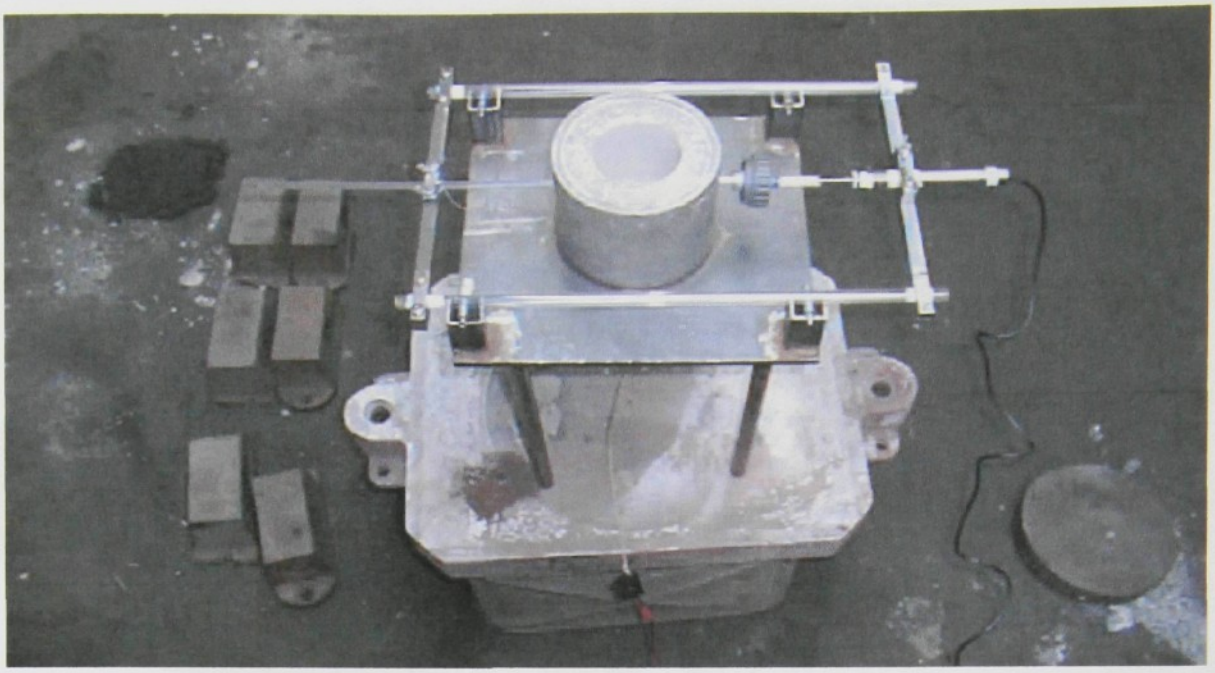


Obr. č. 42 Schéma zapojení měřícího zařízení u odlitku *válcového špalku.*



Obr. č. 43 Měřící a vyhodnocovací zařízení pro odlitek *válcového špalku.*

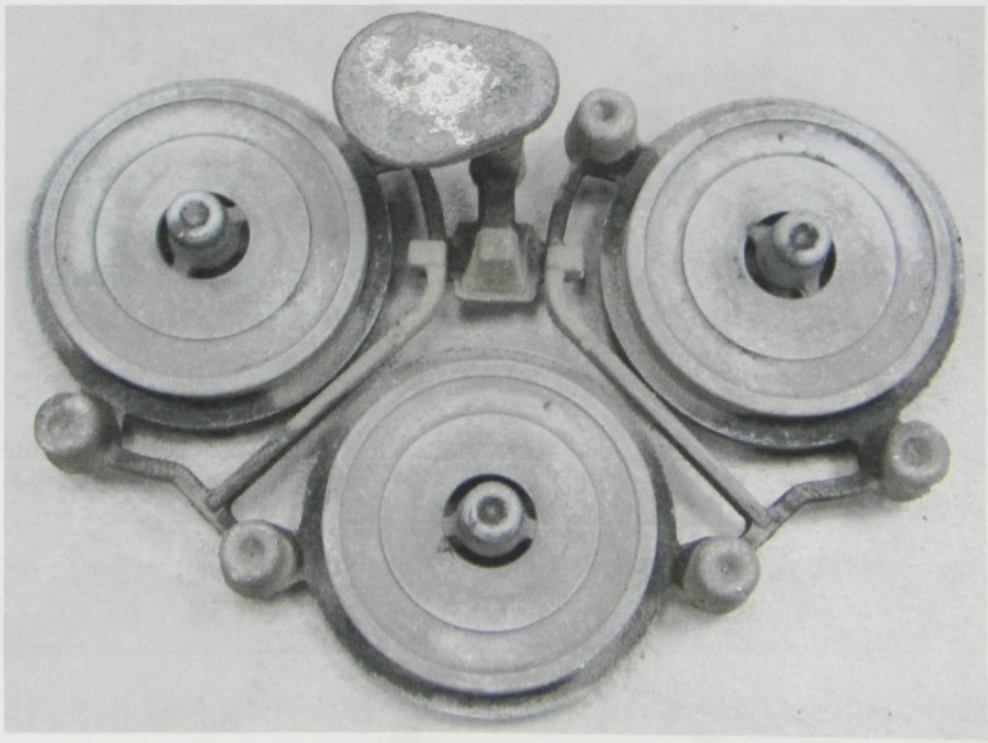
Pohled na připravenou formu s vestavěným snímačem délkových změn je vidět na obrázku č.44. Uvedená konstrukce zkušebního tělesa se hodí pro záznam lineárních změn probíhajících v ose jediného definovaného tepelného uzlu.



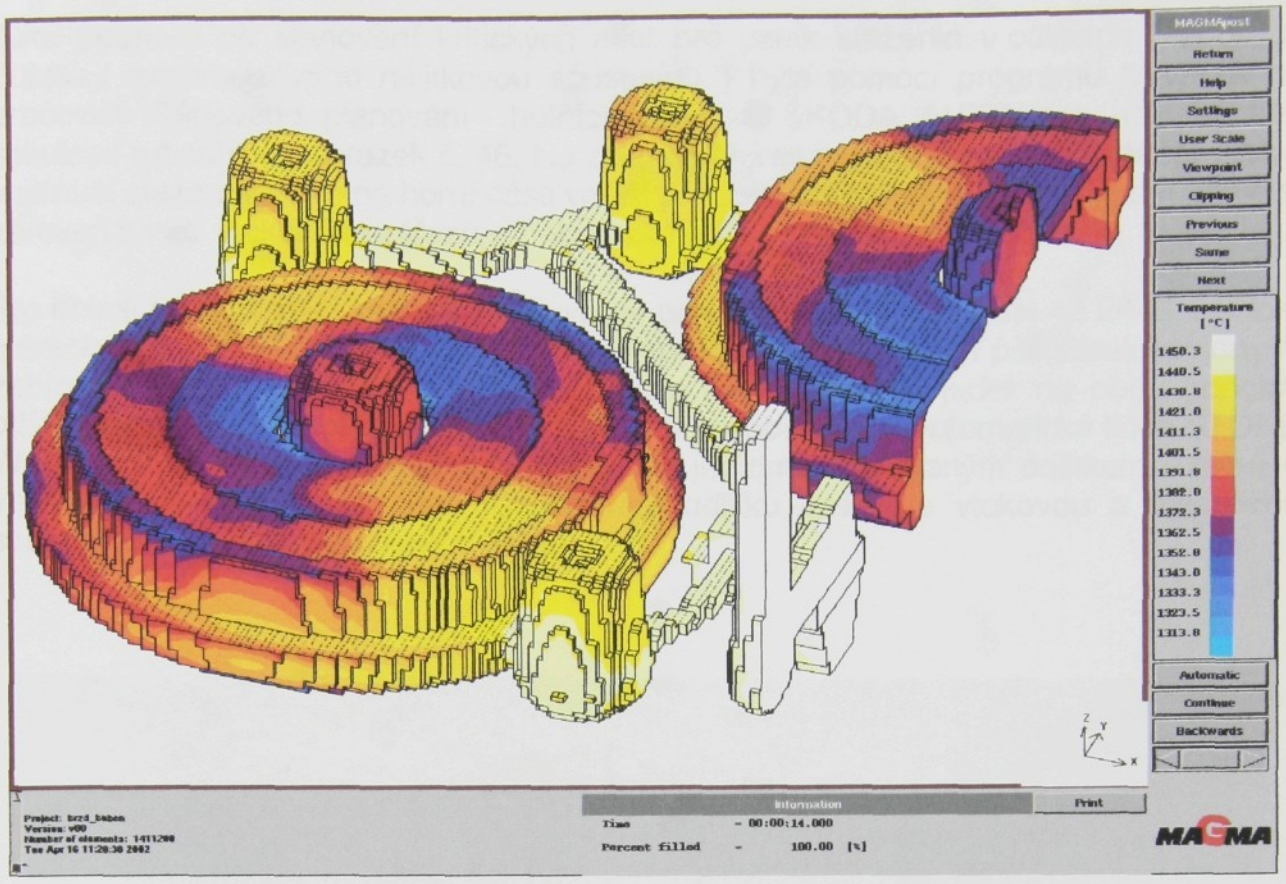
Obr. č. 44 Připravená forma s vestavěným snímačem délkových změn.

3.2.3 Popis sériových odlitků

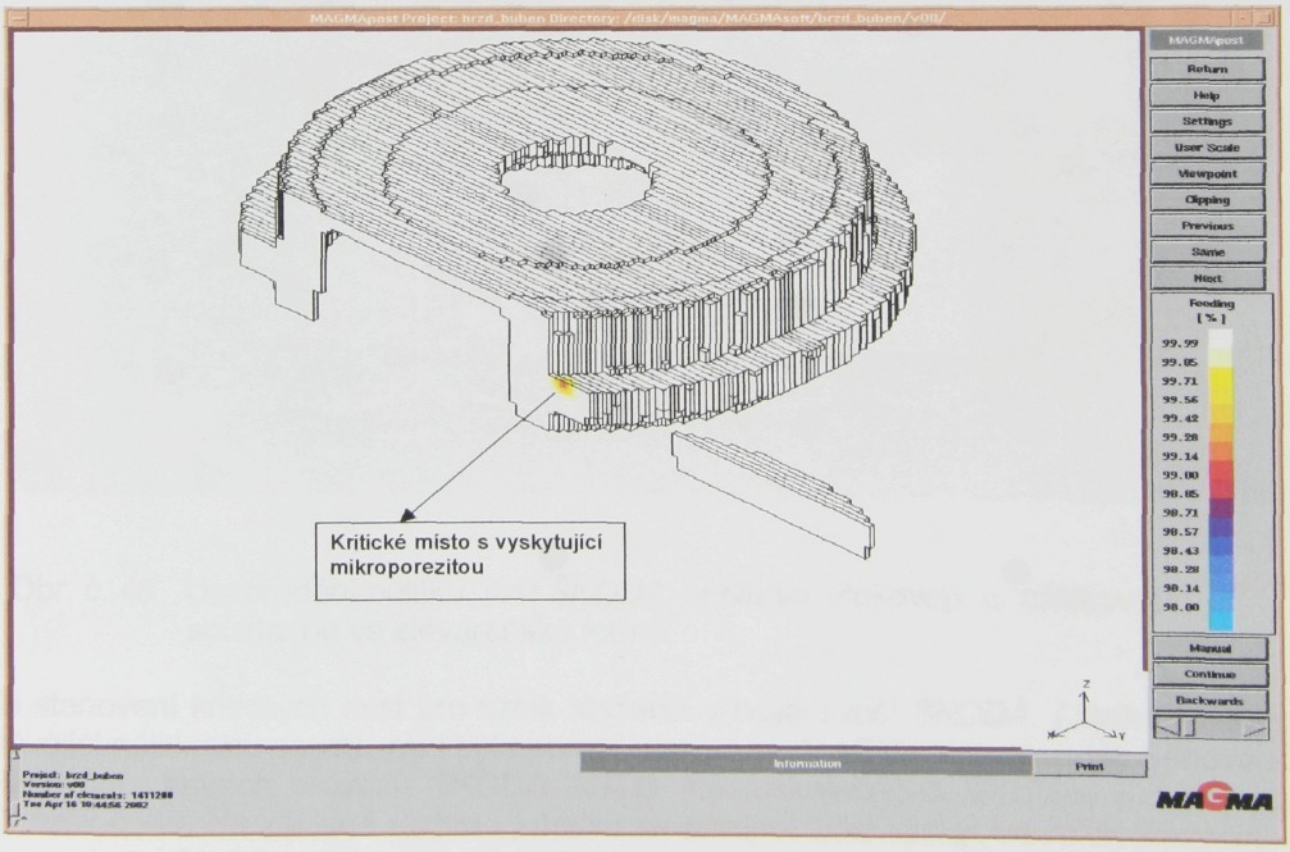
Ke zhodnocení vlivu průběhu dilatace na vznik staženin u sériových odlitků při tuhnutí upravené taveniny ve formě pro zkušební odlitek, byly ve slévárně litin ŠKODA AUTO a.s. pro tyto účely vybrány dva reprezentativní odlitky.
Pro oblast LLG byl vybrán odlitek *brzdový buben ŠKODA* ČSN 42 2425 o rozměrech cca ∅ 246 x 12/20 mm, hrubá hmotnost odlitku je cca 6 kg. Odlévaný je na plnoautomatické lince STONE WALWORK I. s horizontální dělící rovinou a rámem o velikosti 700x500x(2x200) mm. Uspořádání třech odlitků spolu se vtokovou a nálitkovou soustavou je vidět na obrázku č. 45.



Obr.č. 45 Uspořádání odlitků *brzdových bubnů ŠKODA* spolu se vtokovou a nálitkovou soustavou ve slévárenské formě.



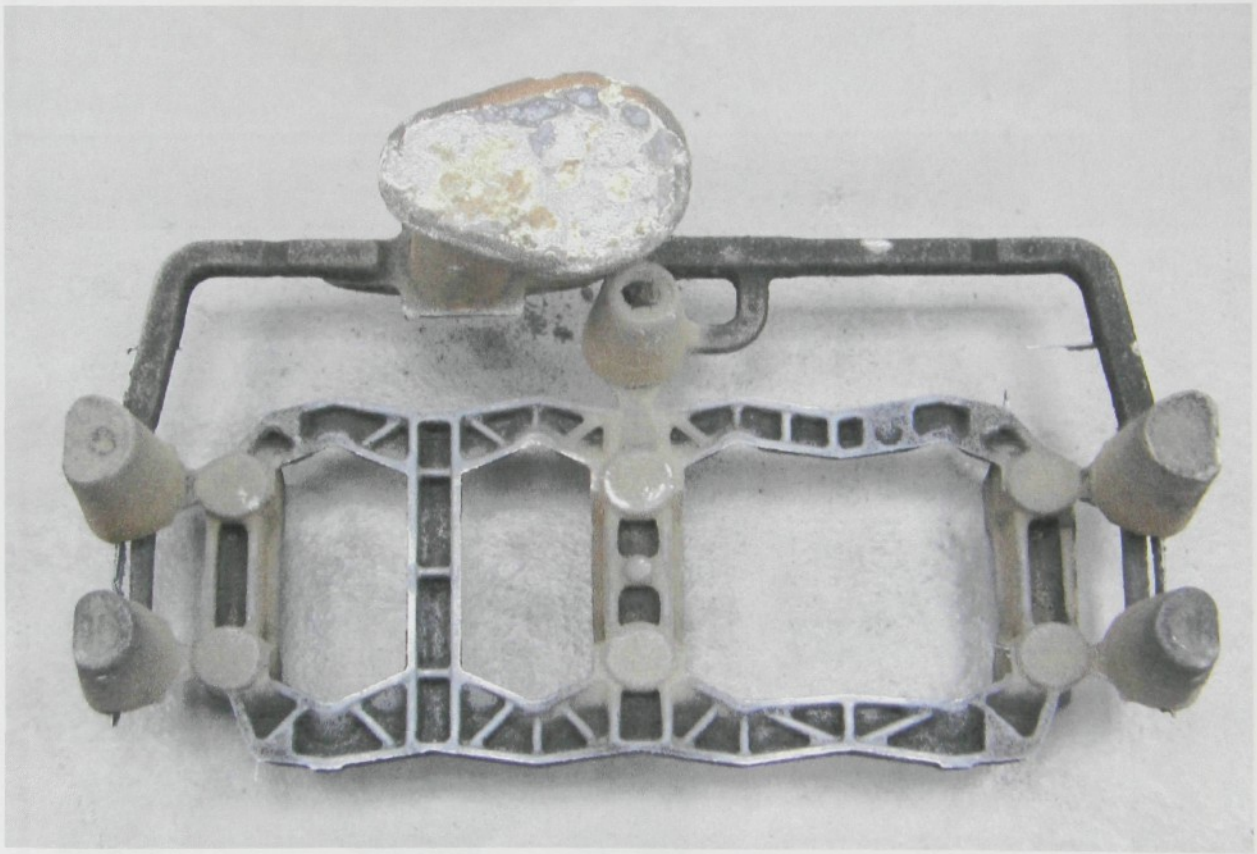
Obr.č. 46 Výsledek simulace tuhnutí taveniny u odlitku *brzdového bubnu ŠKODA*



Obr.č. 47 Zvýraznění kritických míst pro výskyt vnitřních staženin u odlitku *brzdového bubnu ŠKODA*.

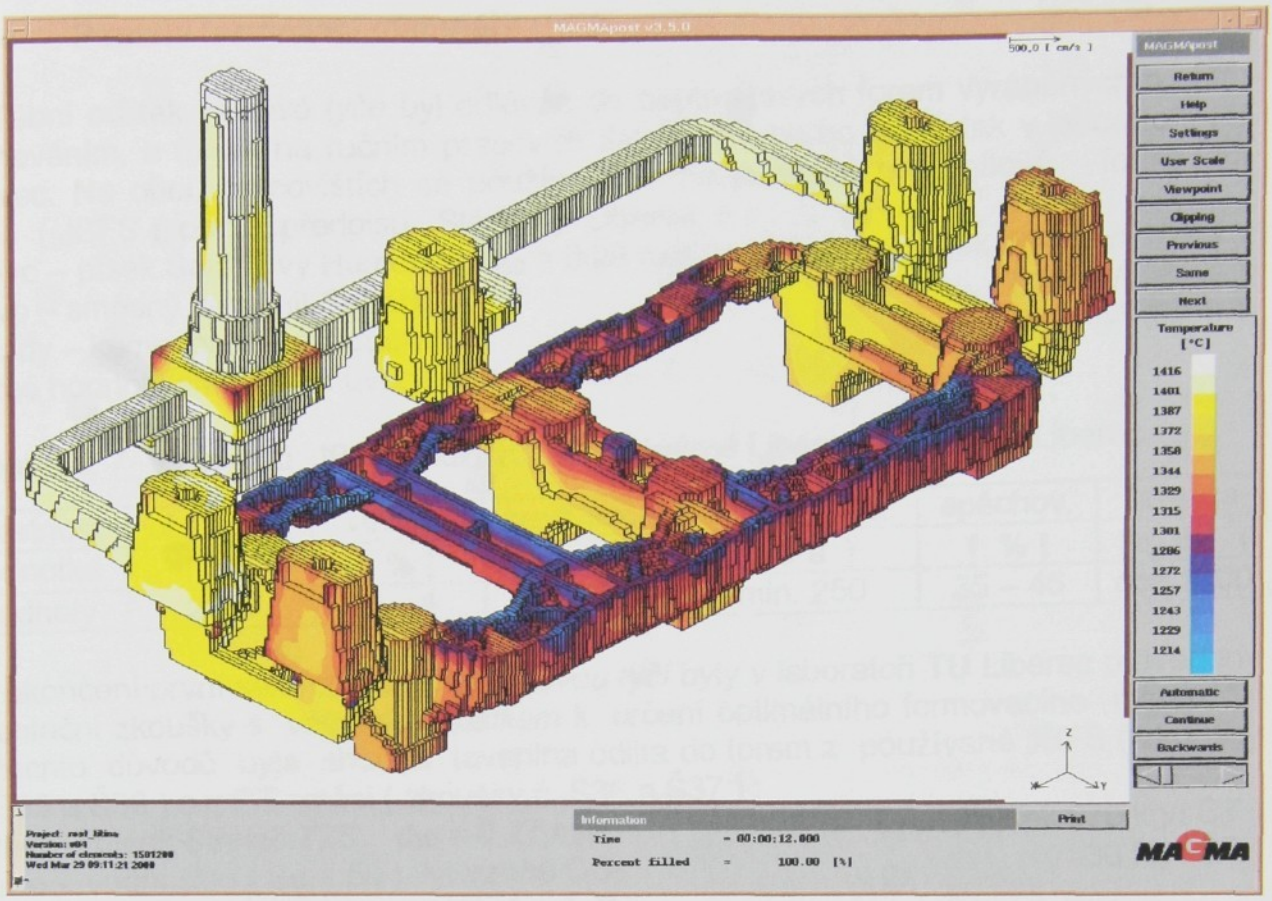
Jako podpora při stanovení kritických míst pro vznik staženin v odlitcích brzdových bubnů (minimalizováno nálitkovou soustavou) byla pomocí programu MAGMA na pracovišti Sériového plánování hutních provozů ŠKODA AUTO a.s. uskutečněna simulace tuhnutí, viz obrázek č. 46. Na základě těchto výsledků se předpokládal výskyt vnitřních staženin, ředin na horní části vnější příruby nad propojením s nálitkem, plnícím zároveň funkci vtokového zářezu,viz obrázek č.47.

Pro oblast LČG (blížící se LKG) byl vybrán odlitek *rošt ŠKODA* AŠN 42 24-001 o rozměrech 370 x 160 x 70 mm. Odlitek je konstrukčně sestaven ze tří půlložisek spojených žebrovanou přírubou, odlévaný pomocí dvou nepravých HB jader na obou koncích odlitku, jeho hrubá hmotnost je cca 6 kg. Díl se vyrábí na poloautomatické lince STONE WALWORK II. s horizontální dělící rovinou a jedním nálitkovaným odlitkem v rámu o velikosti 500x400x(2x160) mm. Uspořádání odlitku spolu se vtokovou a nálitkovou soustavou je vidět na obrázku č. 48.

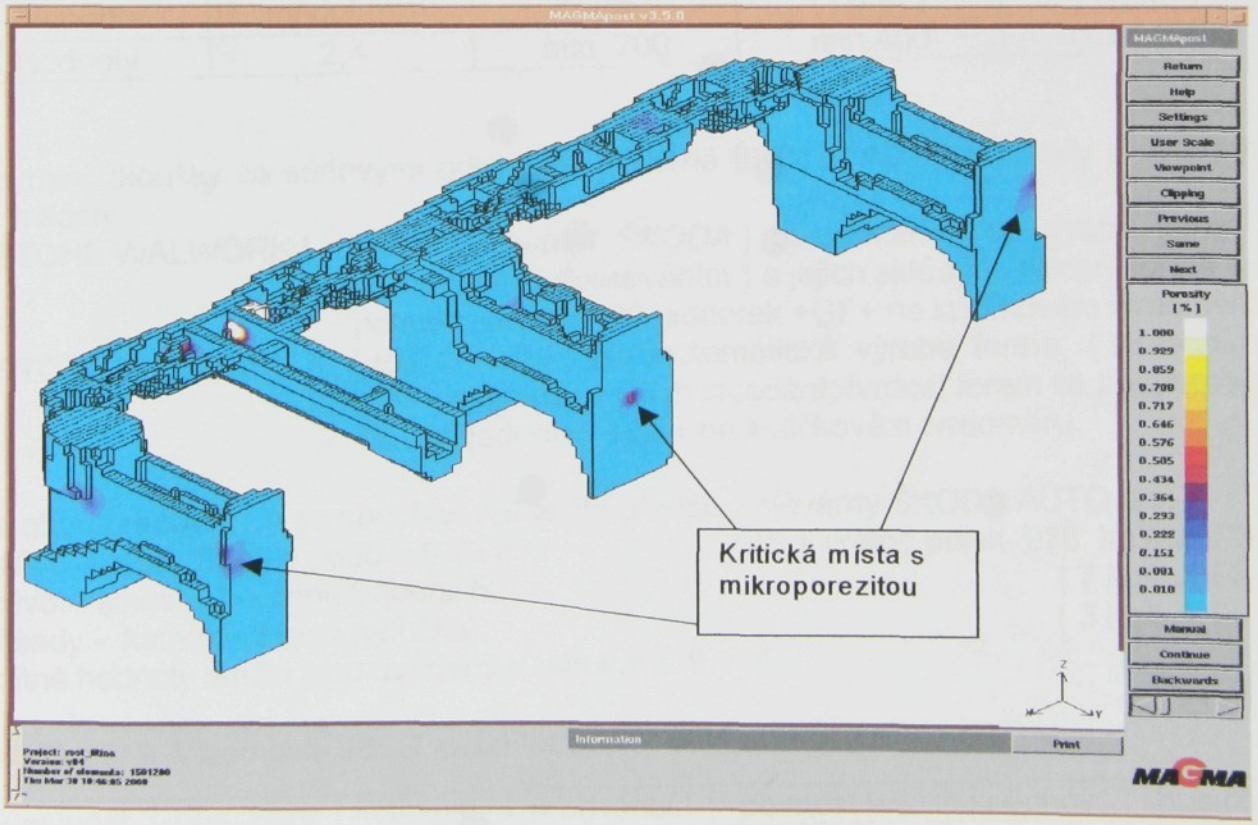


Obr. č. 48 Uspořádání odlitku *rošt ŠKODA* spolu se vtokovou a nálitkovou soustavou ve slévárenské formě.

Ke stanovení kritických míst pro vznik staženin v odlitku *rošt ŠKODA* (riziko sníženo stávající nálitkovou soustavou) byla pomocí programu MAGMA na pracovišti Sériového plánování hutních provozů ŠKODA AUTO a.s. uskutečněna simulace tuhnutí, viz obrázek č. 49. Na základě těchto výsledků se předpokládal výskyt vnitřních staženin – ředin v horní části tepelné osy u středního ložiska a u krajních ložisek v těsné blízkosti u propojení s nálitkem, který zároveň plní funkci vtokového zářezu, viz obrázek č. 50. I přes optimalizovanou vtokovou a nálitkovou soustavu se řediny u sériových odlitků v naznačených místech občas vyskytují.



Obr.č. 49 Výsledek simulace tuhnutí taveniny u odlitku *rošt ŠKODA.*



Obr.č. 50 Zvýraznění kritických míst pro výskyt vnitřních staženin u odlitku *rošt ŠKODA.*

3.2.4 Použité formovací materiály

Zkušební odlitek *válcové tyče* byl odléván do bentonitových forem vyráběných ručním ěchováním, a to jak na ručním pracovišti Slévárny Liberec a.s. , tak v laboratoři TU iberec. Na obou pracovištích se používala stejná jednotná bentonitová formovací měs (JBFS) podle předpisu Slévárny Liberec a.s.:

ostřivo – písek Šajdíkovy Humence, d_{50} = 0,28 mm (vratný písek 988 kg/t JBFS)
pojivo – směsný bentonit Sabenil 50 (11 kg/t JBFS)
přísady – kamenouhelná moučka (cca 1 kg/t JBFS)

Užitné hodnoty směsi jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka č. 7 Vlastnosti JBFS použitých ve Slévárně Liberec a.s. a TU Liberec.

Vlastnost	obs. Bent	vlhkost	prodyšnost	pevnost v tl.	spěchov.	hustota
Jednotka	[%]	[%]	[j.p.SI]	[kPa]	[%]	[kg.m^{-3}]
Hodnoty	2 - 3	3 – 4	min. 200	min. 250	35 – 45	cca 1600

Po ukončení první série zkoušek s *válcovou tyčí* byly v laboratoři TU Liberec provedeny orientační zkoušky s *válcovým špalkem* k určení optimálního formovacího materiálu. Z těchto důvodů byla shodná tavenina odlita do forem z používané JBFS (zkoušky č. Š35 a Š38) a z CT směsi (zkoušky č. Š36 a Š37) :

ostřivo – písek Střeleč T2S , d_{50} = 0,27 mm (nový písek 970 kg/t CT)
pojivo - vodní sklo (Be = 50) vytvrzené CO_2 (30 kg/t CT)

Užitné vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Tabulka č. 8 Vlastnosti CT směsi pojené CO_2, předpis dle Slévárny Liberec a.s.

Vlastnost	vodní sklo	pevnost v tlaku	prodyšnost	hustota
Jednotka	modul (m)	[kPa]	[j.p.SI]	[kg.m^{-3}]
Hodnoty	2,4	min. 700	min.400	cca 1500

Provozní zkoušky se sériovými odlitky ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. byly provedeny na linkách:

- STONE WALWORK I. (*brzdový buben ŠKODA*) plnoautomatická výroba forem (střásáním s dolisováním) a jejich skládání, tvrdost forem se pohybovala 70 - 90 jednotek +GF+ na kuličkovém tvrdoměru
- STONE WALWORK II. (*rošt ŠKODA*) poloautomatická výroba forem (střásáním s dolisováním) a jejich skládání, tvrdost forem se pohybovala 70 - 90 jednotek +GF+ na kuličkovém tvrdoměru

Na obou pracovištích se používá JBFS dle předpisu slévárny ŠKODA AUTO a.s. :

ostřivo – písek Střeleč , d50 = 0,22 mm (15 + vratný písek 975 kg /t JBFS)
pojivo - směsný bentonit Sabenil 50 (7 kg/t JBFS)
Přísady - kamenouhelná moučka (3 kg/t JBFS)

Užitné hodnoty směsi jsou uvedeny v tabulce č. 9

Tabulka č. 9 Vlastnosti JBFS používané ve Slévárně ŠKODA AUTO a.s.

Vlastnost	obs. Bent	vlhkost	prodyšnost	pevnost v tl.	spěchov.	hustota
Jednotka	[%]	[%]	[j.p.SI]	[kPa]	[%]	[kg.m^{-3}]
Hodnoty	5,6 – 6,2	3 – 3,7	min 100	115 – 160	45 – 62	cca 1600

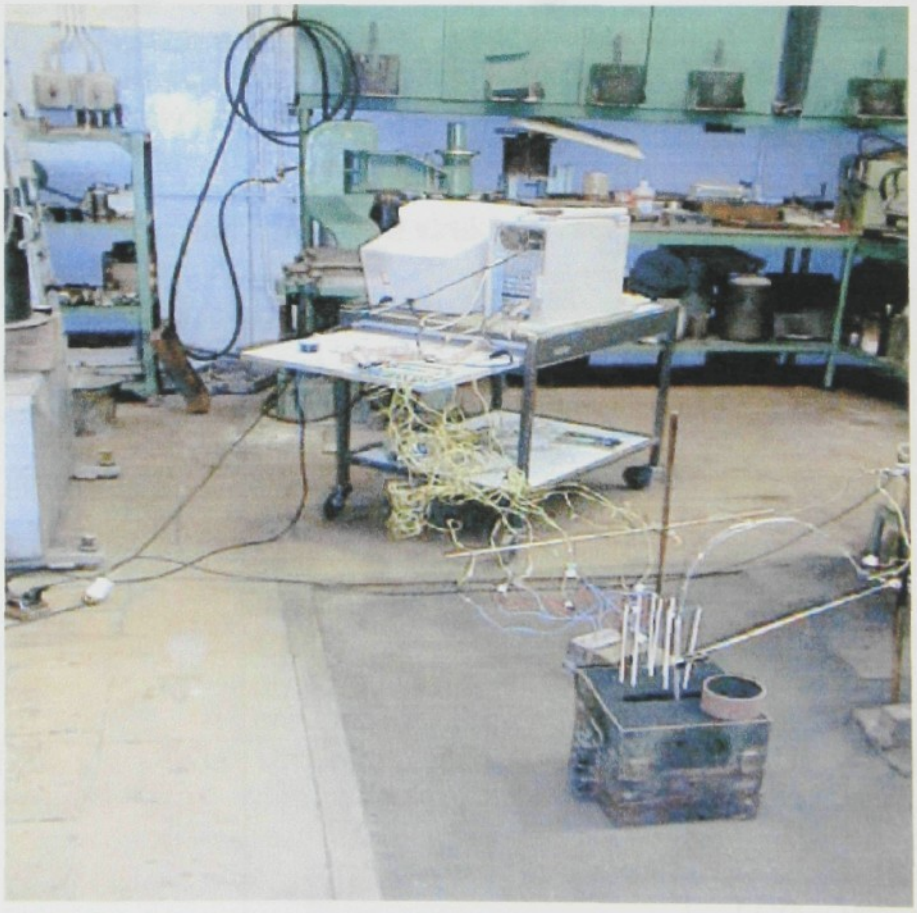
Pro doplnění měření byla vyrobena i ocelová forma – kokila, na které se sledoval dilatační proces tuhnoucí taveniny (při různé rychlosti odvodu tepla formou) ovlivněný stupněm předehřátí kokily: 20°C, 200 °C a 400 °C (zkoušky č. Š39 - Š48).

Pro ucelenou prezentaci užitných vlastností použitých formovacích materiálů byla v laboratoři TU Liberec provedena měření k určení jejich tepelně-fyzikálních hodnot metodou měření teplotních polí ve slévárenské formě podle VEJNIKA, která vychází z nahrazení průběhu teplot od líce formy známou funkcí – parabolou. Odlévaným materiálem byla litina ČSN 42 2420, zkušebním tělesem byla deska (20 x 200 x 200 mm), která při daném zaformování splňuje podmínku :

$$X > X_2 \geq 2M_o \qquad (44)$$

X – tloušťka stěny formy, X_2 – tloušťka prohřáté vrstvy formy, M_o – modul odlitku

Předpokládáme-li, že v okamžiku ztuhnutí odlitku se teplota její odvrácené plochy od líce formy nezvýší proti její výchozí teplotě, pak součinitel tepelné akumulace formy je roven součiniteli tepelné akumulace dané formovací směsi. Vlastní měření bylo provedeno pomocí 8 termočlánků (Ø 0,3 mm NiCr-Ni) zaformovaných postupně ve vzdálenosti 5,10,15,20,25,30,35 a 40 mm od líce odlitku pro stanovení teplotního pole formy, a jedním termočlánkem (Ø 1 mm NiCr-Ni) , který sledoval teplotu odlitku. Jako zkušební materiál odlitku byla použita LLG ČSN 42 2425. Získané časové závislosti teplot se po transformaci na A/D převodníku zaznamenávaly na PC viz obrázek č. 51.



Obr. č. 51 Celkové uspořádání použitého zařízení pro měření teplotních polí JBFS.

Ze zjištěných časových průběhů teplot v určitých vzdálenostech od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku a z dalších potřebných údajů pro stanovení množství tepla odvedeného z tuhnoucího odlitku byly podle vztahu (15), uvedeného v kapitole 2.3.2, vypočteny následující fyzikální veličiny viz tabulka č. 10. Ve výpočtu byl použit aritmetický průměr dílčích stupňů neupravené paraboly. Získané výsledky jsou v souladu s měřeními NOVÉ [56] prováděnými v minulých letech na TU Liberec. Ze získaných dat se v současné době při využití výpočetní techniky (pro simulaci tuhnutí a chladnutí odlitků) pracuje především s měrným teplem a tepelnou vodivostí formovacích směsí. Součinitel tepelné akumulace formy byl využíván především do nástupu výpočetní techniky.

Tabulka č. 10 Vypočtené fyzikální hodnoty materiálů forem (formovací směsi JBFS, CT vyrobeny dle postupu Slévárny Liberec a.s.)

fyz. veličina -	tepelná vodivost λ_F	měrné teplo c_F	teplotní vodivost a_F	souč.tepelné akumul. b_F
jednotka	$J.s^{-1}.m^{-1}.K^{-1}$	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$m^2.s^{-1}$	$J.s^{-1/2}.m^{-2}.K^{-1}$
JBFS	1,84	827,44	0,65.10-6	1 138
CT	1,04	863,81	0,81.10-6	1 172
ocel. kokila	3,38	525,8	0,98.10-6	3 601

3.2.5 Použité tavící agregáty

Pro porovnání provozních a laboratorních podmínek uvedené dilatační zkoušky byla použita tavenina vyrobená v různých pecích (indukčních, kupolních i plynových pecí). Jednotlivé tavící agregáty spolu se vsázkou jsou uvedeny v tabulce č. 11.

Tabulka č. 11 Použité tavící agregáty a struktura vsázky.

Slévárna	tavící agregát	vsázka cca
TU Liberec Laboratoře KSM	středofrekvenční indukční pec, obsah 20 kg	LLG – vratný mat. 95% LKG – vratný mat. 90% (LČG) oc.šrot(dle potřeby)
Slévárna Liberec a.s.	Kupolní pec ∅1000 mm, dmýchaný vzduch 300°C, injektáž kyslíku do tav. pásma, kontinuální odvod strusky ze sifonu, sklopné plynové vyhřívané 5t předpecí	LLG – vratný mat. 30% slév. železa 20% ocel.železa 22% ocel.šrot 25% FeSi,FeMn 3%
ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav	středofrekvenční indukční pec obsah 4t , JUNKER	LLG – vratný mat. 35% ocel.šrot 50% sur.železo 15% FeSi+Mn,SiC 5% LČG – vratný mat. 45% sur.železa 10% FeSi,SiC 5%

Henry Kyncl Turnov	kupolní pec ∅ 700 mm bez předehřevu dmých. vzduchu pevné 1,5t předpecí 15t udržovací kanálková pec cyklický odpich taveniny a strusky středofrekvenční indukční pec, obsah 0,5t	LLG – vratný mat. 30% sur. železa 50% ocelový šrot 15% FeSi+Mn,SiC 5% LKG – vratný mat. 35% sur. železa 30% ocelový šrot 30% FeSi, SiC 10%
Metalurgie Rumburk a.s.	rotační plynová pec obsah 12t výkon 6t za hodinu	LLG – vratný mat. 30% slév. železa 25% ocel.železa 20% ocel. šrot 10% FeSi, FeMn 5%
ČKD a.s. Hradec Králové	kupolní pec ∅ 1500 mm bez předehřevu dmých. vzduchu kontinuální odvod strusky sklopné plynové předpecí 5t	LLG – vratný mat. 30% sur.železa 45% ocel. šrot 20% FeSi,FeMn 5%

3.2.6 Použitá kvalita litiny a její sekundární zpracování

Pro laboratorní i provozní zkoušky byly vybrány litiny odpovídající požadavkům na reálné odlitky odlévané na formovacích linkách s JBFS: perliticko-feritické LLG - ČSN 42 2420,25 a feriticko-perlitické LČG - AŠN 42 24-001 či LKG - ČSN 42 2303,4.

Pro studium grafitizace při tuhnutí taveniny byl vždy jako první použit ničím neupravený tekutý kov, následně tavenina s různým množstvím modifikátoru, očkovadla a v ojedinělých případech i legury pro stabilitu perlitu. Přehled použitých kvalit litin spolu se způsobem modifikace a očkování taveniny jsou uvedeny v tabulce č. 12, chemické složení každé zkoušky je uvedeno v tabulce provozních a naměřených hodnot č. 23 (*válcová tyč*) a č. 24-A,B,C (*válcový špalek*) v příloze.

Modifikace ve slévárně ŠKODA AUTO a.s. se prováděla polévací metodou do modifikační pánve pomocí předslitiny FeSiMg. Následně pobíhalo sekundární grafitizační očkování do proudu kovu při přelévání z modifikační 700 kg pánve do 250 kg licích pánví. Ve slévárně Henry Kyncl v Turnově je požívána modifikační průtočná - směšovací komora s následným grafitizačním očkováním do proudu kovu tak, že do 1t licího bubnu se vlévá již upravená (modifikovaná a očkovaná) tavenina.

Grafitizační očkování LLG probíhalo na žlábku kupolní pece, nebo při přelévání taveniny z udržovacích pecí do licích bubnů. Naočkovaná tavenina ve slévárnách ČKD Hradec Králové (velký blok pro lodní motor) a Metalurgie Rumburk (stůl pro horizontální frézku) byla před nalitím do formy na 15 minut odstavena pro dosažení požadované (nižší) licí teploty. V tabulce č.13 jsou uvedeny všechny použité předslitiny k modifikaci a grafitickému očkování litin. Během všech provedených měření byla pečlivě dodržována předem definovaná technologie metalurgických a měřících procesů pro opakovatelnost měření.

Tabulka č.12 Přehled použitých kvalit litin spolu se způsobem modifikace a očkování taveniny.

Slévárna	Použitá kvalita litiny	sekundární zpracování	druh modif.,očkovadla
TU Liberec Laboratoře KSM	LLG ČSN 42 2420 ČSN 42 2425 LKG ČSN 42 2340	očkování do proudu taveniny při přelévání modif.polévací metoda	FeSi 75 Zircinoc, Superseed FeSiMg
Slévárna Liberec a.s.	LLG ČSN 42 2420 ČSN 42 2425	očkování do proudu taveniny při přelévání	FeSi 75 Zircinoc, Superssed
ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav	LLG ČSN 42 2425,P VW TL 011 LČG AŠN 42 24-001	očkování do proudu taveniny při přelévání modif.polévací metoda	FeSi 75 Zircinoc, Superssed FeSiMg , CuSb RANCO-Impfkohle
Henry Kyncl Turnov	LLG ČSN 42 2420 ČSN 42 2430 LKG ČSN 42 2340, 60	očkování do proudu taveniny na žlábku modif.skrz komoru	FeSi 75 Zircinoc, Superssed FeSiMg
Metalurgie Rumburk a.s.	LLG ČSN 42 2420	očkování do proudu taveniny na žlábku (prodleva 15 min)	FeSi 75 0,3% Sb 0,03%
ČKD a.s. Hradec Králové	LLG ČSN 42 2425	očkování do proudu taveniny při přelévání (prodleva 15 min)	FeSi 75

Tabulka č. 13 Přehled použitých předslitin pro modifikaci a grafitické očkování litin (M – modifikátor, O – očkovadlo, L - legura).

Označení předslitiny	Zrnitost (mm)	Chemické složení (%) Si%,Ca%,Al%(Sr,Zr,Mg,Ba,C)	Dodavatel
FeSiMg Compaktmag (M)	3 - 5	44-48 1,8-2,3 1 max Mg = 5 – 6 Re = 5 – 7	ELKEM
FeSi 75 (O)	10 - 15	73-78 0,3max 1,2max	FERONA
Zircinoc (O)	1 - 3	73-78 2- 2,5 1 - 1,5	ELKEM
Superseed 75 (O)	1 - 5	73-78 0,1max 0,5max Sr = 0,6-1	ELKEM
LMC BARYUM (O)	2 - 7	64-66 1,5max 0,7max Ba = 0,9-1	PEM (Fr)
RANCO-Impfkohle(O)	0,5 - 1	C=85 S=0,1 rest prchavé hořlaviny	Rich.Anton
Cu (L)	20x10x8	Cu = 99	Kovošrot
CuSb (L)	20x20x8	Cu = 50 Sb = 50	Sl. Velim

3.2.7 Popis provedených měření

V rámci každého jednotlivého měření byly provedeny následující činnosti :

a) příprava měřící aparatury, aktivace elektronických prvků (snímače teploty a dilatace, převodník A/D, PC) ;

b) měření teploty taveniny po úpravě (modifikace, grafitizační očkování, legování) v několika ojedinělých případech bylo měřeno množství aktivního kyslíku ;

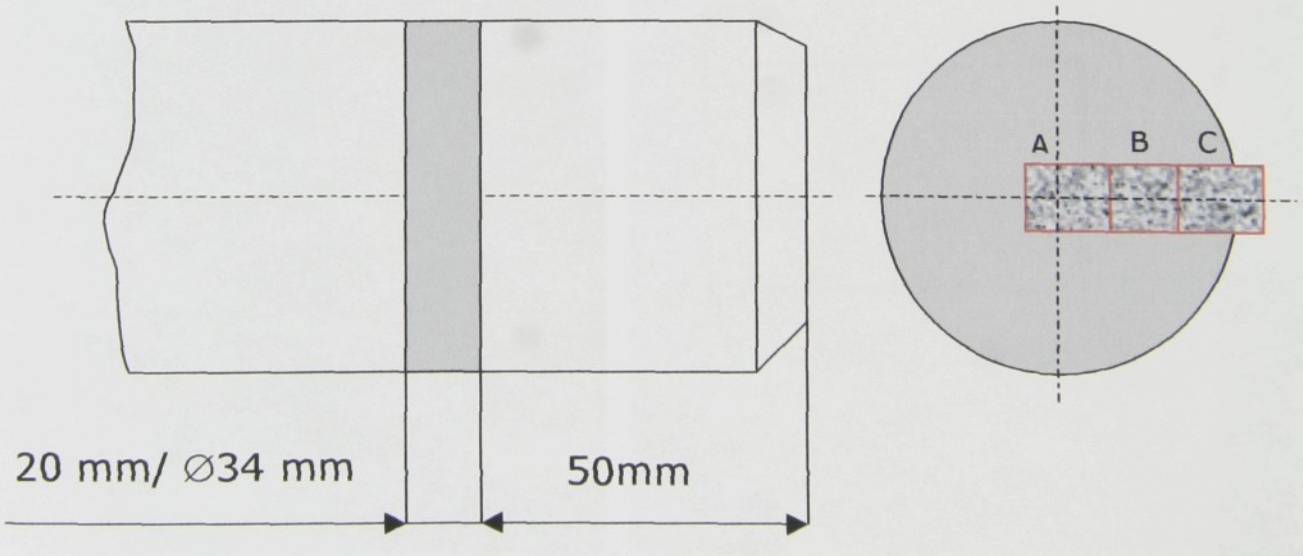
c) nalití upravené taveniny do zkušební formy, popřípadě zároveň do provozní formy pro výrobu sériových odlitků k porovnání provozních výsledků ;
d) odběr taveniny k analýze chemického složení na kvantometru LECO (při provozních zkouškách i pro zákalkovou zkoušku) ;
e) snímání a evidence teplotní a dilatační křivky,konec měření pod teplotou 900°C ;
f) po vychladnutí byly zkušební odlitky (v případě provozních zkoušek i sériové odlitky) otryskány a podrobeny dalším destruktivním (metalografické hodnocení) i nedestruktivním zkouškám (zkoušky prozařovací, měření ultrazvukovým tlouškoměrem).

Všechna prezentovaná měření spolu s provozními a naměřenými hodnotami jsou uvedena v tabulce č. 23 a č.24 -A,B,C v příloze.

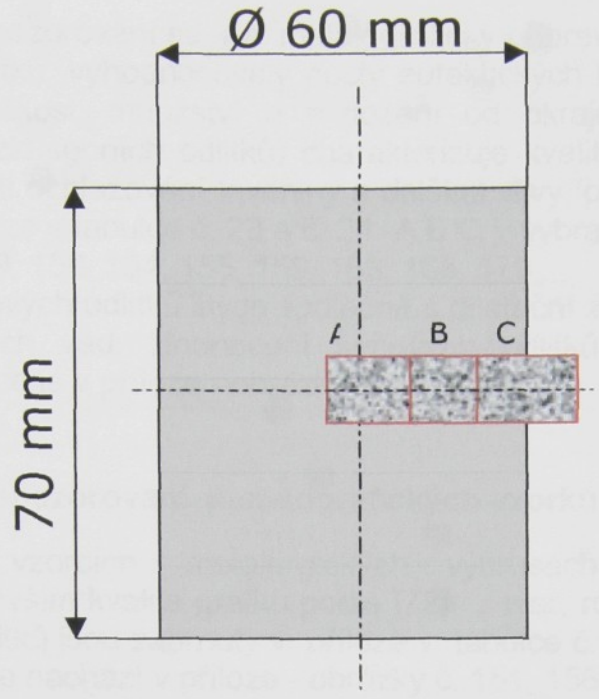
3.3 Zpracování dosažených výsledků

3.3.1 Metalografické vyhodnocení zkušebních vzorků a sériových odlitků

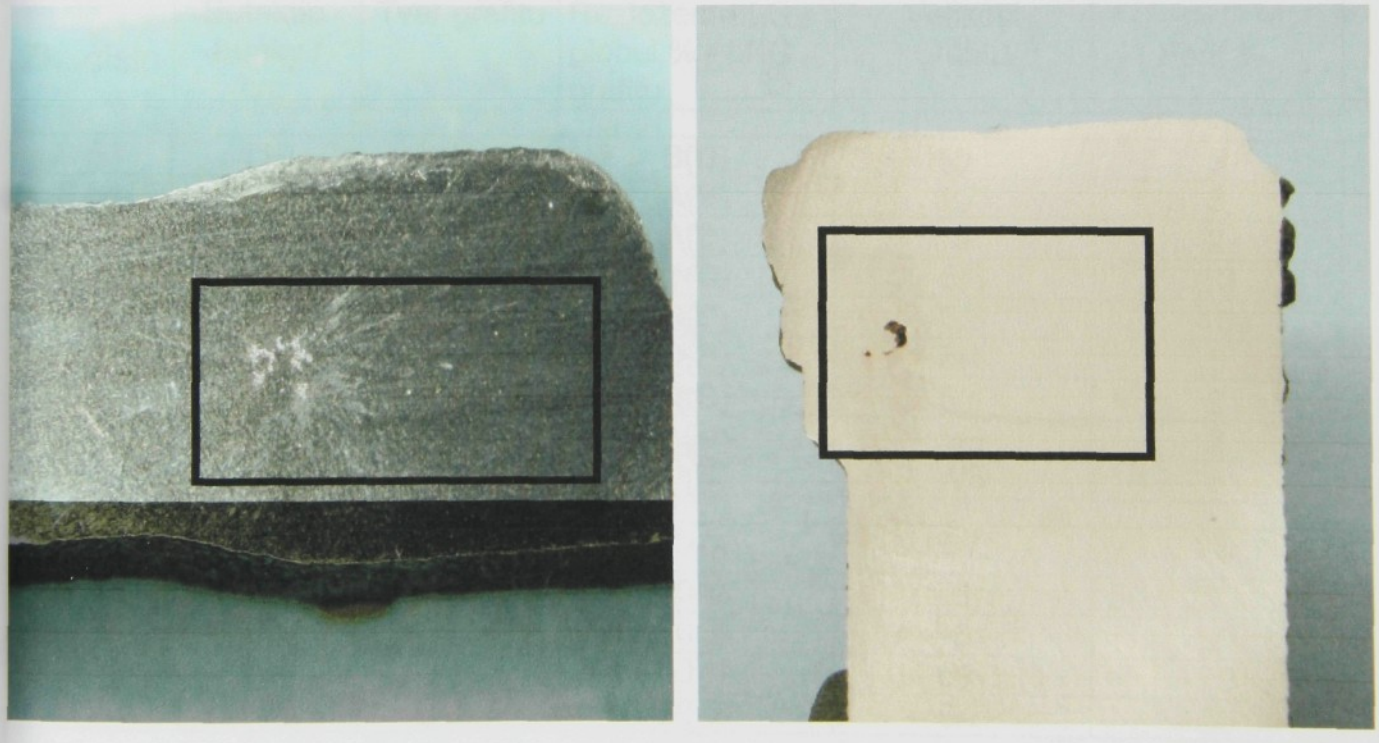
Metalografické vyhodnocení vzorků se provádělo na optickém mikroskopu OLYMPUS PMG 3, na kterém se zároveň zhotovovaly snímky struktur pomocí digitálního fotoaparátu OLYMPUS 3030.
U zkoušek s *válcovou tyčí* byly odebrány vzorky o tloušťce 20 mm ve vzdálenosti 50 mm od okraje na straně termočlánku, viz obrázek č. 52.
U *válcového špalku* byly vzorky odebírány ze střední části řezu v rovině rotační osy špalku, viz obrázek č. 53. U sériových odlitků byly vzorky odebírány v místě vyskytujících se vad homogenity, viz obrázek č. 54. Na vzorcích bylo provedeno hodnocení v rámci makropozorování i mikropozorování .



Obr. č. 52 Schématické znázornění místa odběru metalografického vzorku u *válcové tyče*. (vzoreky: A – osa odlitku, B – stěna, C – kraj odlitku).



Obr. č. 53 Schématické znázornění místa odběru metalografického vzorku u *válcového špalku.* (vzoreky: A - osa odlitku, B - stěna, C - kraj odlitku).



A **B**

Obr. č. 54 Znázornění místa odběru metalografického vzorku u sériových odlitků: A – *brzdový buben ŠKODA*, B – *rošt ŠKODA*

3.3.1.1 Makropozorování metalografických vzorků

V rámci makropozorování se na metalograficky připravených vzorcích, ze zkušebních i sériových odlitků, vyhodnocovaly počty eutektických buněk EB/cm^2 podle MINISTRA [69]. Jejich velikost, množství a rozložení od okraje vzorku až po tepelnou osu (komplexně u zkušebních odlitků) charakterizuje kvalitu a kvantitu zárodků ovlivňující spolu s rychlostí ochlazování taveniny a dalšími vlivy, průběh grafitizace. Výsledky jsou zahrnuty v příloze v tabulce č. 23 a č. 24 -A,B,C , vybraná fotodokumentace je v příloze - obrázky č. 149, 150, 154, 155, 159, 163, 168, 176.
Vzorky ze sériových odlitků litých společně s dilatační zkouškou byly odebírány v místě výskytu vnitřních vad. Hodnocení sériových odlitků je v tabulce č. 14, vybraná fotodokumentace je v příloze - obrázky č. 170, 178.

3.3.1.2 Mikropozorování metalografických vzorků

Na stejných vzorcích (metalurgických výbrusech) se v rámci mikropozorování hodnotila především kvalita grafitu podle [72], : tvar, rozložení a velikost. Výsledky ze zkušebních odlitků jsou zahrnuty v příloze v tabulce č. 23 a č. 24 -A,B,C vybraná fotodokumentace se nachází v příloze - obrázky č. 151, 156, 160, 164, 169, 177.
Vzorky ze sériových odlitků litých společně s dilatační zkouškou se odebíraly v místě výskytu vnitřních vad. Hodnocení sériových odlitků je v tabulce č. 14, vybraná fotodokumentace je v příloze - obrázky č. 171, 172, 179, 180.

Tabulka č.14 Hodnocení eutektických buněk a grafitu u sériových odlitků,
zkoušky č. Š 63 – 71 jsou z *brzdových bubnů ŠKODA* (LLG),
zkoušky č. Š 74 – 78 jsou z *roštů ŠKODA* (LČG, LKG).

Zk. číslo	Eutektic. buňky / cm^2	Tvar grafitu	Rozložení-LLG globul.% - LKG grafitu	Velikost grafitu	Ferit %
Š 63	110	L	B(D)	5	5
Š 64	130	L	A(B)	5(7)	5
Š 65	180	L	A(B)	5	2
Š 66	130	L	B(D)	5/6	10
Š 67	90	L	D(B)	5/6	10
Š 68	150	L	D(B)	5/4	5
Š 69	200	L	D(B)	5/4	2
Š 70	140	L	A(D)	5/6	2
Š 71	180	L	D(B)	4/5	5
Š 74	120	G + Č	50 %	6/7	70
Š 75	80	G + Č	20 %	6	50 + 20 ledeb.
Š 76	280	G +(Č)	80 %	6	30
Š 77	230	G + Č	50 %	5/6	70
Š 78	270	G + Č	50 %	6/7	50

Příklad hodnocení : X/Y – na výbrusu je patrná hodnota X společně s hodnotou Y.
X(Y) – na výbrusu je patrná hodnota X, hodnota Y je zastoupena pouze lokálně.
L – lupínkový grafit, Č – červíčkový grafit, G – kuličkový grafit, A,B,D – rozložení grafitu

3.3.2 Hodnocení grafitu pomocí ultrazvukového tloušťkoměru

Pro duplicitní hodnocení grafitu u zkoumaných litinových vzorků byla použita metoda rychlosti šíření akustických - ultrazvukových vln.
Pro toto nepřímé vyhodnocení kvality grafitu je rozhodující poměr naměřených hodnot relativní rychlosti zvuku Vr u zkoumaných vzorků :

$$V_r = \frac{l}{l_u} \qquad (45)$$

l - tloušťka měřeného vzorku zjištěná pomocí posuvného měřítka (mm)
l_u - tloušťka měřeného vzorku zjištěná pomocí ultrazvukového měřidla (mm)

Akustické vlny prostupují materiál tím hůře, čím větší je množství a velikost vnitřních nespojitostí – grafitu. Naopak, čím je výsledek bližší vůči 1, klesá odpor překážek (globulárnější tvar, menší velikost a množství grafitu) vůči ultrazvukovému vlnění probíhajícímu zkoumaným vzorkem. Kvalitativní hodnocení grafitu podle zjištěné relativní rychlosti zvuku Vr lze určit pomocí hodnot uvedených v odborné literatuře [49,67], viz orientační tabulka č. 15.

Tabulka č. 15 Orientační hodnoty relativní rychlosti zvuku Vr odpovídající danému typu grafitu u zkoumaných litin /67/.

Typ grafitu	Lupínkový	červíkovitý	kuličkový
Relativní rychlost zvuku Vr	0,6 – 0,8	0,84 – 0,90	0,94 - 0,97

Použitý ultrazvukový tloušťkoměr T-Scopedl 2,2 MHz firmy Strecstel (USA) byl seřízen na odpovídající tloušťku stěny ocelového vzorku, kde se uvažuje poměr změřené tloušťky stěny ultrazvukovým tloušťkoměrem – Lu a použitým digitálním posuvným měřítkem – L roven jedné. Následně probíhalo měření na litinových vzorcích, jejichž výsledky byly závislé především na morfologii vyloučeného grafitu. Získané výsledky ze zkušebních odlitků jsou uvedeny v tabulkách přílohy č.23 - *válcová tyč* (všechny zkoušky), č. 24 -B,C – *válcový špalek* (mimo zkoušek č. Š 1 – 38) a výsledky ze sériových odlitků v tabulkách č.16 - *brzdový buben ŠKODA* a č.17 - *rošt ŠKODA*.

Tabulka č.16 Měření ultrazvukovým tloušťkoměrem na vzorcích sériových odlitků *brzdové bubny ŠKODA*.

zkouška číslo	l (mm)	l_u (mm)	V_r
Š 63	11,35	14,7	0,772
Š 64	11,70	15,2	0,770
Š 65	11,60	14,6	0,795
Š 66	11,80	14,6	0,808
Š 67	11,35	14,8	0,767
Š 68	11,40	15,1	0,755
Š 69	11,60	15,1	0,766
Š 70	11,50	14,9	0,771
Š 71	11,75	14,8	0,794

Tabulka č. 17 Měření ultrazvukovým tloušťkoměrem na vzorcích sériových odlitků *roštu ŠKODA* v místě tepelného uzlu u vtokového zářezu.

zkouška číslo	l (mm)	l_u (mm)	v_r
Š 74	37,497	42,13	0,89
Š 75	37,483	40,30	0,93
Š 76	37,491	39,05	0,96
Š 77	37,523	41,23	0,91
Š 78	37,523	39,91	0,94

3.3.3 Hodnocení homogenity vzorků a sériových odlitků

3.3.3.1 Hodnocení pomocí RTG defektoskopie

Touto metodou byly vyhodnoceny všechny odlitky dvou posledních provozních zkoušek, s různou sekundární úpravou taveniny, provedených v provoze slévárny ŠKODA AUTO a.s. při výrobě *brzdových bubnů ŠKODA* (zkoušky č. Š 64 – 72, 6 odlitků na každou zkoušku, celkem 54 odlitků) a *roštů ŠKODA* (zkoušky č. Š 74 - 78, 1 odlitek na zkoušku, celkem 5 odlitky). Zjištěné výsledky defektoskopického pozorování jsou v tabulkách č. 18 a č. 19.
Vnitřní homogenita odlitků se vyhodnocovala na provozním zařízení, které se používá ve slévárně litin ŠKODA AUTO a.s., jedná se o defektoskop ANDREX DC HF 225 od firmy YXLON (Dánsko). Vzorový RTG snímek vady ve stěně odlitku *brzdového bubnu* je na obrázku č. 55.

Tabulka č. 18 Výsledky defektoskopie u odlitků *brzdový buben ŠKODA*.

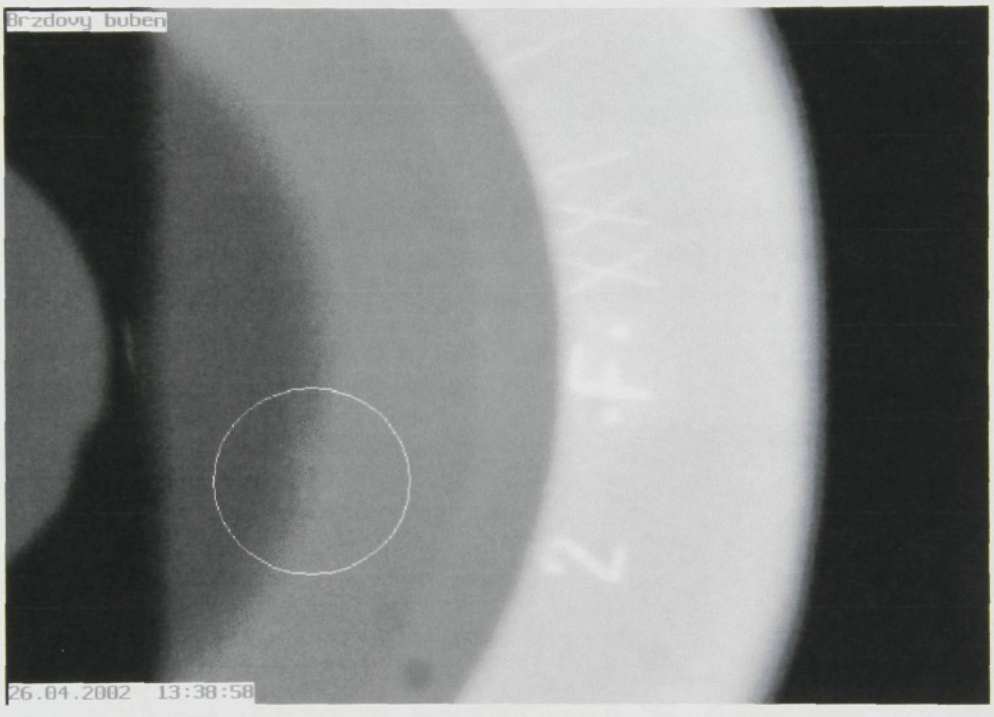
Zk. číslo	RTG 0	RTG 1	RTG 2	RTG 3	celkem odlito	koeficient heterogenity
Š 63	3 ks	D,A,A	-	-	6 ks	3
Š 64	5 ks	A	-	-	6 ks	1
Š 65	2 ks	-	-	B,F,F,H	6 ks	12
Š 66	-	A,A,C,F,F	E	-	6 ks	7
Š 67	1 ks	A,A,C,F,F	-	-	6 ks	5
Š 68	3 ks	A,D	A	-	6 ks	4
Š 69	2 ks	A,F	A,F	-	6 ks	6
Š 70	4 ks	F	A	-	6 ks	3
Š 71	1 ks	A,A,A	A,F	-	6 ks	7

Označení velikosti průměru vady řediny nalezené na horní slabé přírubě brzdových bubnů: 0 mm = RTG 0, 0 –5 mm = RTG 1, 5 – 10 mm = RTG 2, 10 mm a více = RTG 3.
Písmeny A až H je označeno 8 výsečí na odlitku orientovaných dle dvou vtoků.
Koeficient heterogenity = Σ počet kusů x váha vady.
Váha vady je RTG 0 = 0, RTG 1 = 1, RTG 2 = 2 atd.

Tabulka č. 19 Výsledky defektoskopie u odlitků *roštu ŠKODA.*

zkouška číslo	Velikost vady	koeficient heterogenity
Š 74	RTG 1	1
Š 75	RTG 3	3
Š 76	RTG 0	0
Š 77	RTG 0	0
Š 78	RTG 0	0

Označení velikosti průměru vady řediny nalezené v tepelném uzlu u vtoku : 0 mm = RTG 0 , 0 – 5 mm = RTG 1 , 5 – 10 mm = RTG 2 ,10 mm a více = RTG 3. Koeficient heterogenity viz tabulka č.18



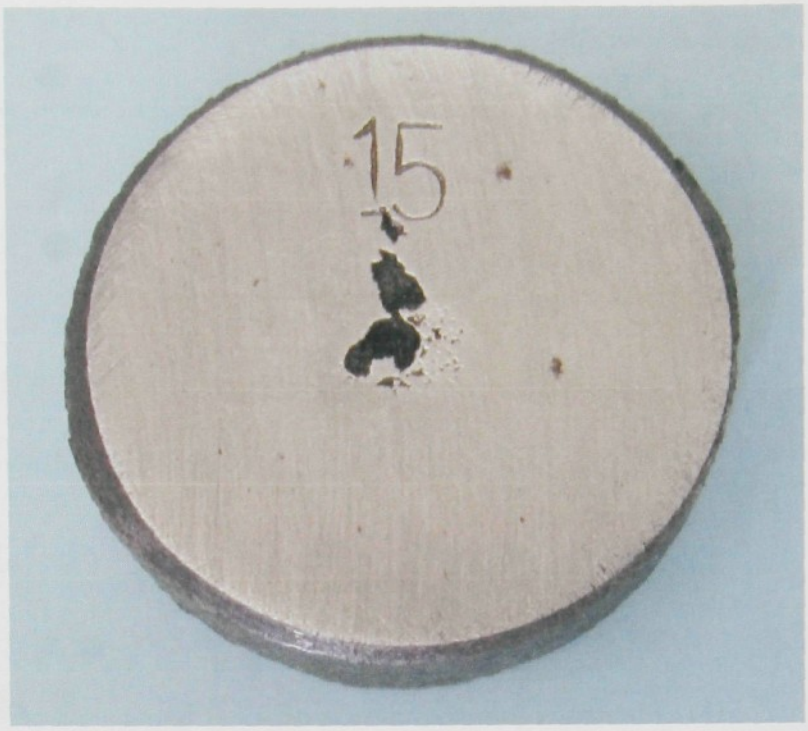
Obr. č. 55 RTG snímek prozářené stěny odlitku brzdového bubnu ŠKODA s nalezenou vnitřní vadou.

3.3.3.2 Hodnocení odlitků na řezech pomocí optické mikroskopie

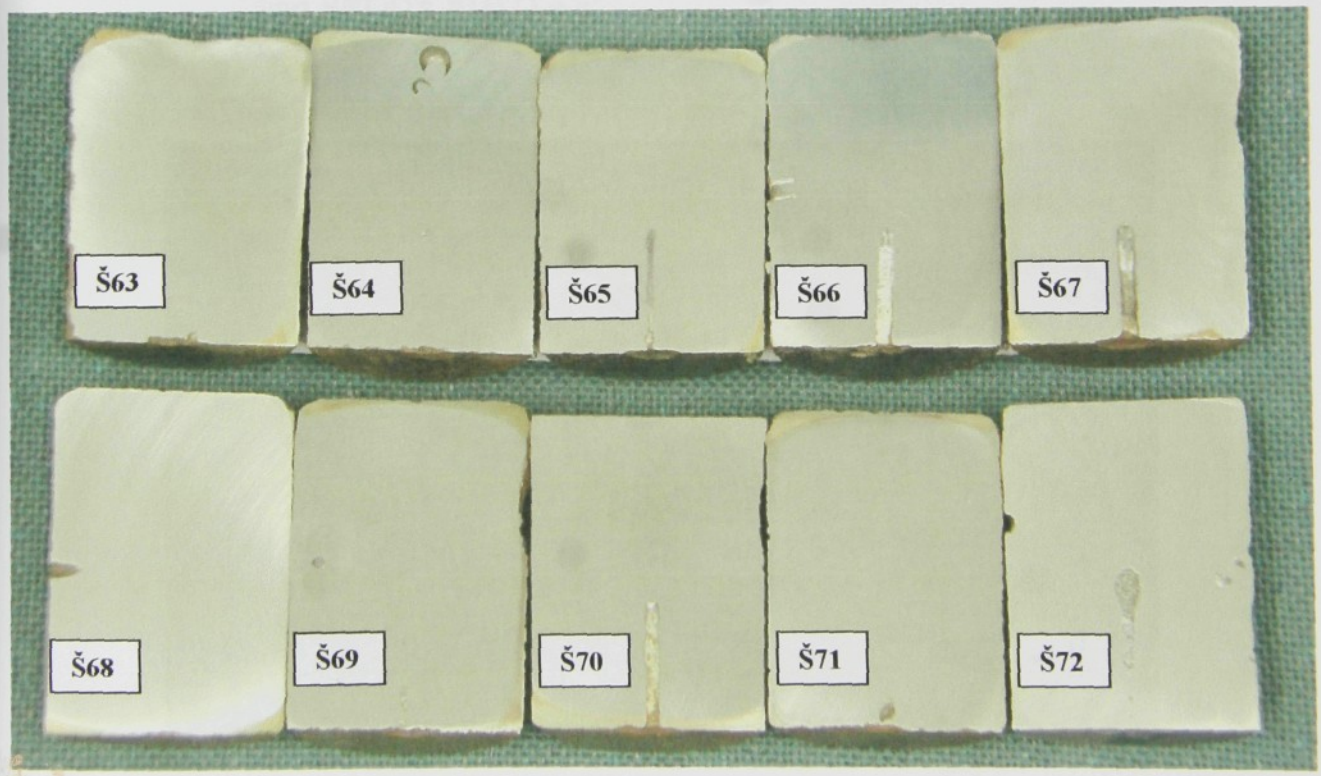
Další součástí makropozorování bylo vyhodnocení zjištěných staženin či ředin, jak u zkušebních, tak i u sériových odlitků, na ploše řezu v místě jejich předpokládaného či RTG zjištěného výskytu.

U zkušebních odlitků *válcové tyče* byly v místě příčného řezu nalezeny 2 vzorky s vadou celistvosti v podélné, tepelné ose tyče:

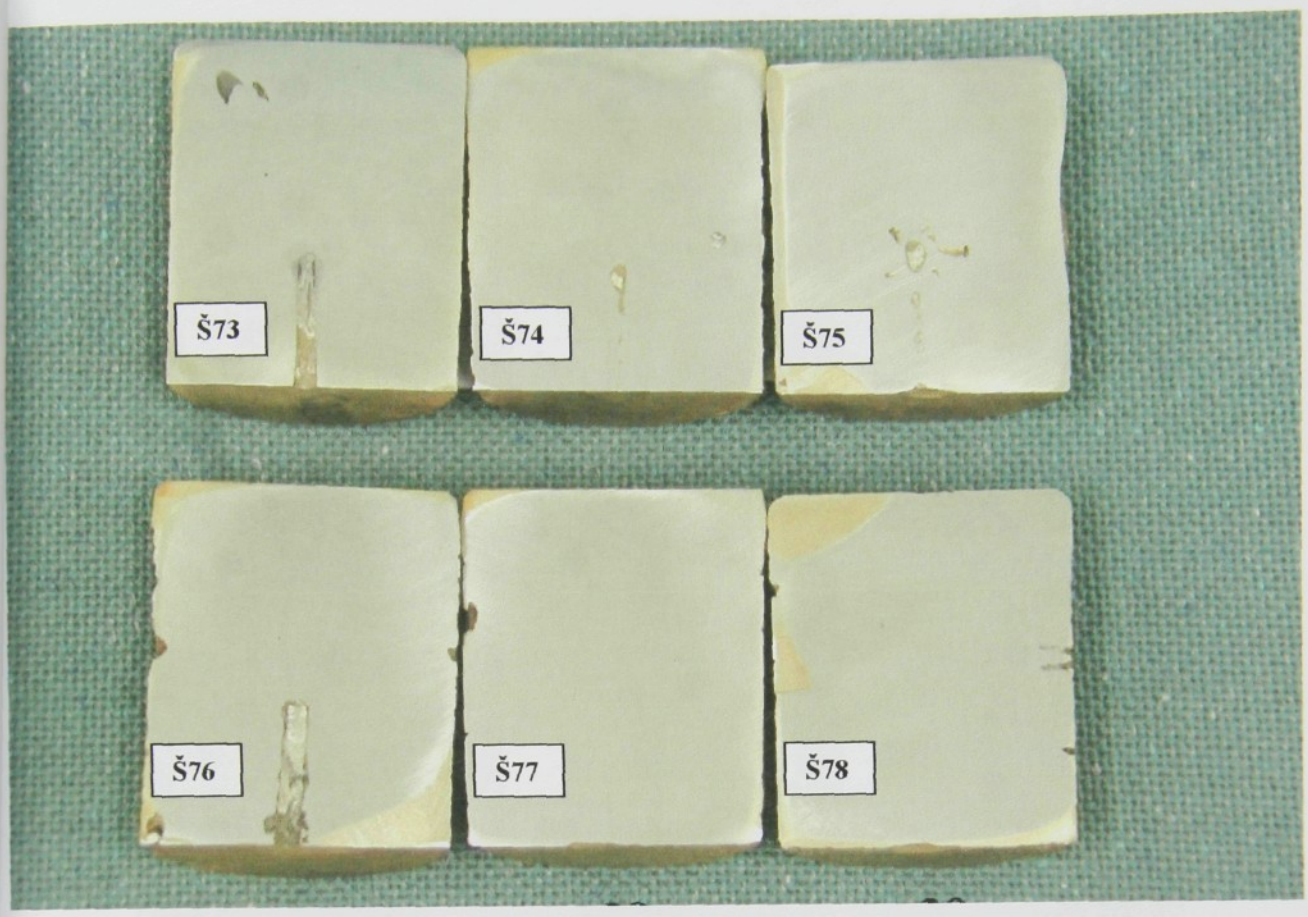
- zkouška číslo T9 (LČG), velikost vady na ploše řezu 3 x 7 mm, vadu tvoří z 90 % na tři části rozdělená staženina, 10 % plochy zaujímá ředina v bezprostředním okolí staženin viz obrázek č. 56.
- zkouška číslo T16 (LLG), velikost vady na ploše řezu 0,5 x 1 mm, vadu tvoří ředina v ose odlitku



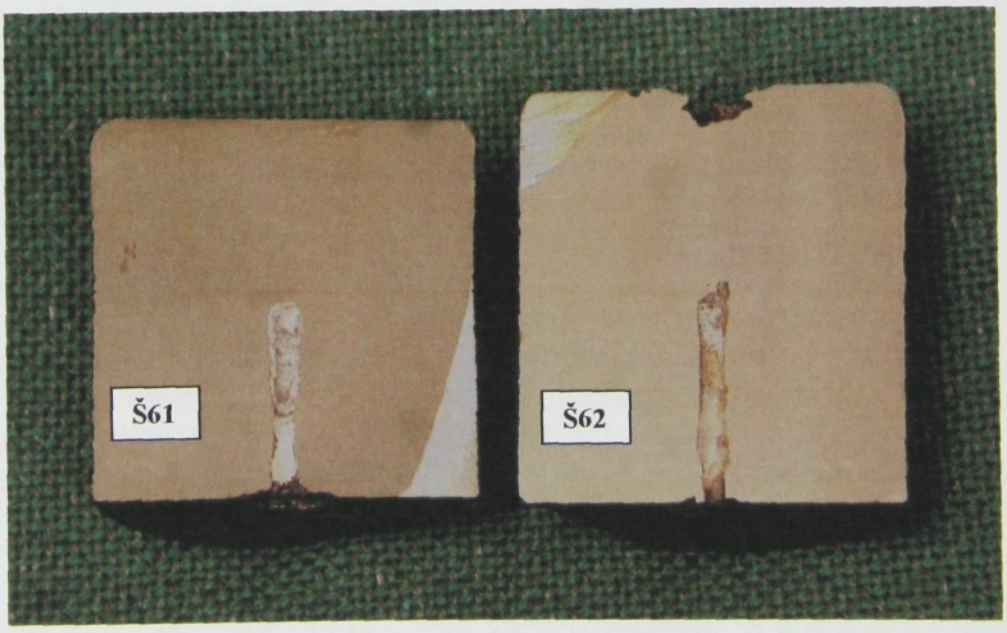
Obr. č. 56 Soustředěná staženina v podélné tepelné ose u válcové tyče zkouška č. T9 (s původním označením na hodnocené ploše), laboratorní měření (LČG) na TU Liberec.



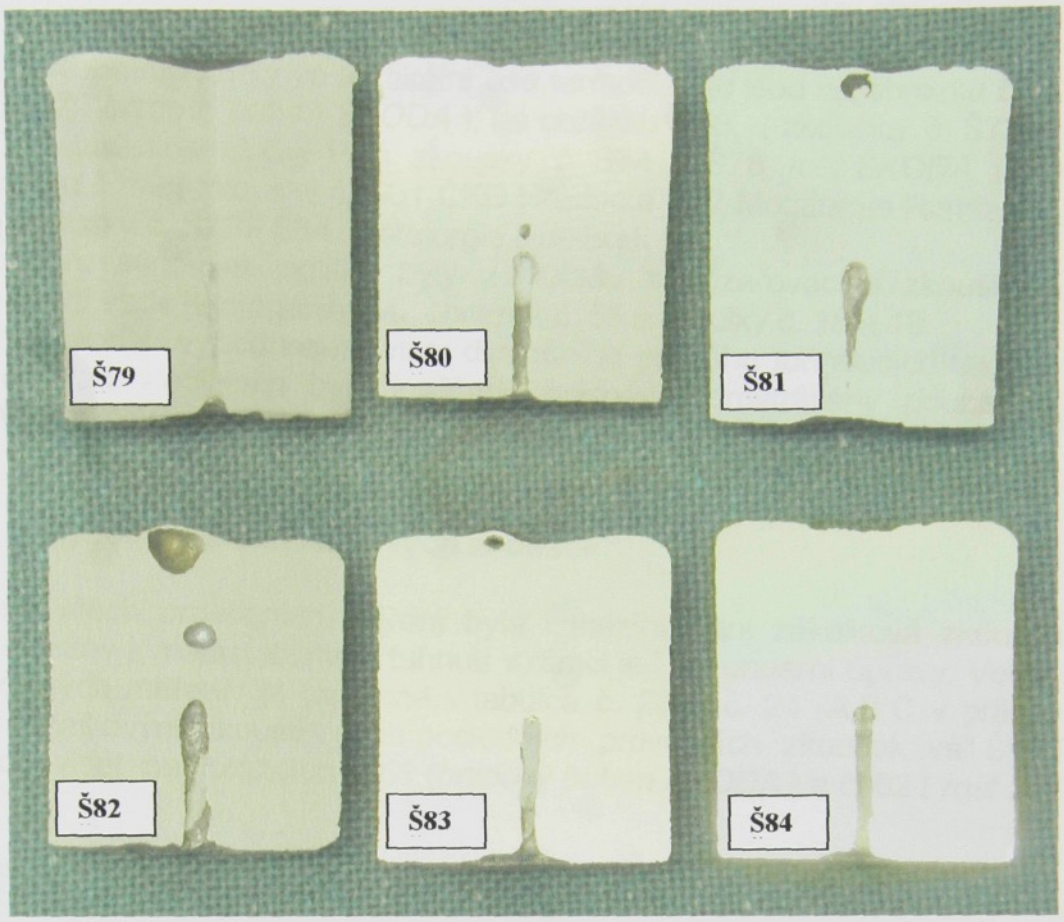
Obr. č. 57 Řezy *válcovým špalkem* ve vertikální ose termočlánku, zk. č.Š63-Š72, zkušební odlitky při sériové výrobě *bubnu ŠKODA* (LLG) a (LLG + P , Š 72) ve Slévárně litin ŠKODA AUTO a.s.



Obr. č. 58 Řezy *válcovým špalkem* ve vertikální ose termočlánku, zk. č.Š73-Š78, zkušební odlitky při sériové výrobě *roštu ŠKODA* (LČG) ve Slévárně litin ŠKODA AUTO a.s.



Obr. č. 59 Řezy *válcovým špalkem* ve vertikální ose termočlánku, zk. č. Š61 slévárna ČKD Hradec a zk. č. Š62 Metalurgie Rumburk.



Obr.č. 60 Řezy *válcovým špalkem* ve vertikální ose termočlánku, zk. č. Š79-Š84 Metalurgie Rumburk.

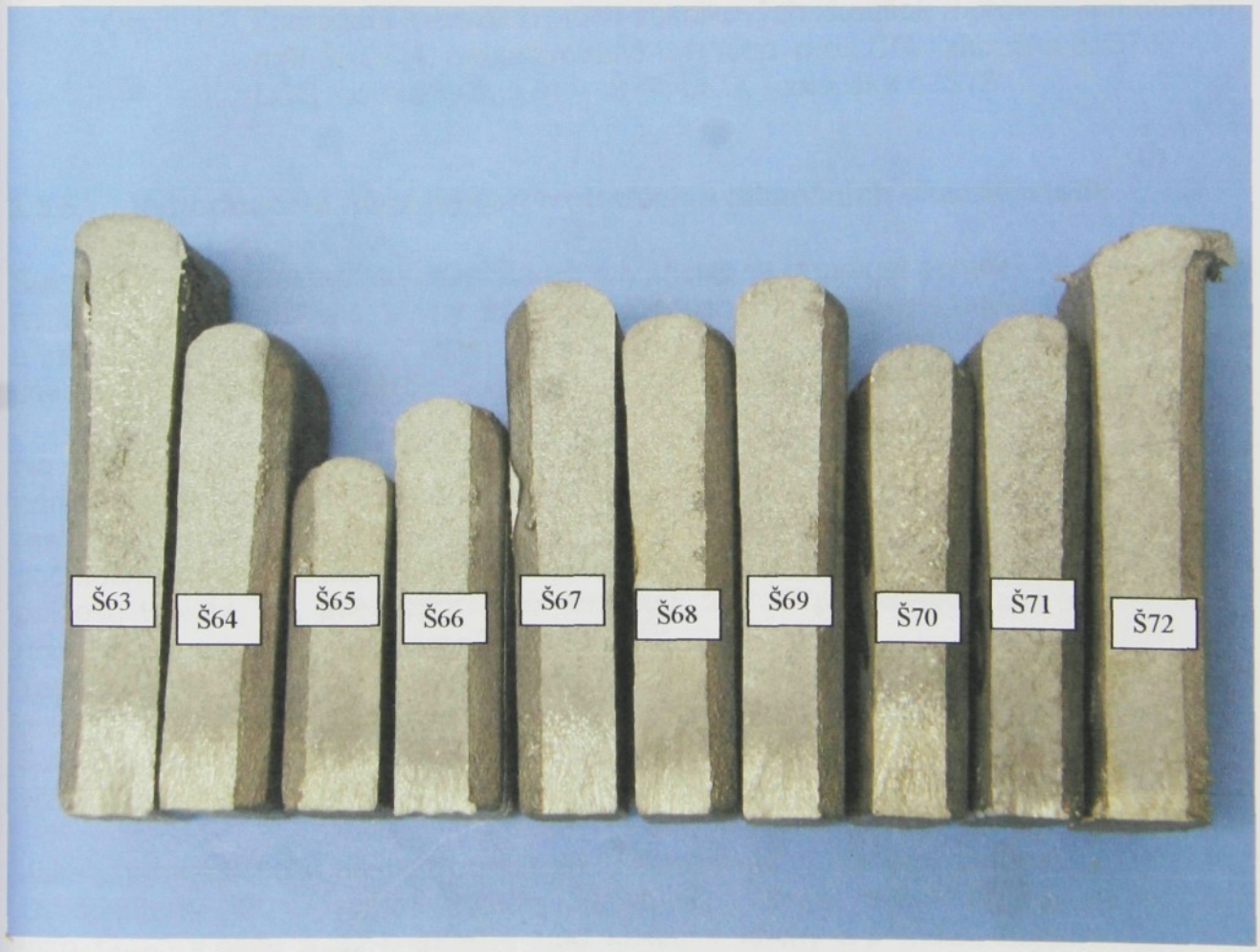
Ze souboru zkoušek s *válcovým špalkem* byly na ploše vertikálního řezu zkušebním odlitkem v ose termočlánku nalezeny následující vady homogenity :

- zkouška číslo Š62 (LLG), velikost vady 3 x 7 mm, vada se nachází na povrchu v ose špalku a tvoří ji otevřená plynová staženina.
- zkouška číslo Š64 (LLG), velikost vady 5 x 7 mm, vada se nachází 3 mm pod povrchem v ose špalku a tvoří ji na dvě části rozdělená plynová staženina s výronkem.
- zkouška číslo Š73 (LLG), velikost vady 5 x 7 mm, vada se nachází 5 mm pod povrchem na kraji špalku a tvoří ji plynová staženina s výronkem.
- zkouška číslo Š75 (LČG), vada se nachází na ploše 10 x 15 mm uprostřed vzorku okolo špičky termočlánku, tvoří ji rozptýlená ředina.
- zkouška číslo Š80 (LLG), velikost vady 1 x 1,5 mm, vada se nachází v ose špalku 2 mm nad špičkou termočlánku, tvoří ji plynová staženina.
- zkouška číslo Š81 (LLG), velikost vady 3 x 4 mm, vada se nachází v ose špalku 1 mm pod jeho povrchem, tvoří ji plynová staženina s výronkem.
- zkouška číslo Š82 (LLG), dvě vady o velikosti 3 x 4 a 5 x 7 mm, vady se nacházejí v ose špalku 15 a 1 mm pod jeho povrchem, tvoří je plynové staženiny.
- zkouška číslo Š83 (LLG), velikost vady 1 x 1,5 mm, vada se nachází v ose špalku 1 mm pod jeho povrchem , tvoří ji plynová staženina

Řezy zkušebními odlitky ve vertikální ose termočlánku jsou na obrázku č. 57,(zkoušky č. Š63- Š72 *brzdový buben ŠKODA*), na obrázku č.58, (zkouška č. Š73 *vložky válců ŠKODA* , tavenina LLG + P a zkoušky č. Š74 – Š78 *rošt ŠKODA*, tavenina LČG) na obrázku č. 59 (zkoušky č. Š61 ČKD Hradec a Š62 Metalurgie Rumburk) a obrázek č. 60 (zkoušky č. Š79 - Š84 Metalurgie Rumburk).
Ze souboru sériových odlitků byly v souladu s prozařovacími zkouškami nalezeny odpovídající vady homogenity viz obrázek č. 55 a tabulky č. 18 a 19.
Pro objektivnost vyhodnocení vlivu dilatačního průběhu tuhnoucích tavenin na výskyt vnitřních vad v odlitcích byly změřené hodnoty porovnávány pouze s vadami na sériových odlitcích viz kapitola 4.1.2.3 .

3.3.4 Vyhodnocení zákalkových zkoušek

Součástí všech provozních měření byla i mezinárodní zákalková zkouška ověřující sklon taveniny k metastabilnímu tuhnutí v rámci její sekundární úpravy. Velikost zákalky u jednotlivých měření je uvedena v tabulce č. 23 a č. 24 -A,B,C v příloze. Lomové plochy zákalkových zkoušek dvou posledních provozních zkoušek ve ŠKODA AUTO a.s. jsou vidět na obrázcích č. 61 (*brzdový buben ŠKODA*) a č. 62 (*rošt ŠKODA*).



Obr.č. 61 Zobrazení lomových ploch zákalkových zkoušek u provozních měření:
brzdový buben ŠKODA, LLG zkoušky č. : Š63 – Š71,
vložky válců ŠKODA , LLG (P) zkouška č. Š72,

Obr.č. 62 Zobrazení lomových ploch zákalkových zkoušek u provozních měření: *rošt ŠKODA*, neupravovaná tavenina pro LČG - zkouška č. Š73, LČG - zkoušky č. Š74 – Š77, LKG - zkouška č. Š78.

3.3.5 Vyhodnocení naměřených teplotních a dilatačních charakteristik

Sledování a záznam teplotních a dilatačních křivek se prováděl pomocí A/D převodníků na PC, kde se získané křivky za účelem přesného stanovení bodů (kulminačních a inflexních) derivovaly. Z jejich průběhů byly odečteny hodnoty velikosti a časového umístění charakteristických bodů odpovídajících krystalizačním stádiím litiny.

Na teplotní křivce a především po její derivaci, bylo možné popsat : maximální naměřenou teplotu odlévané taveniny T max, teplotu likvidu T_L(v čase t_L), eutektickou reakci vlivem chemického složení (Si, P ...) charakterizovanou intervalem teplot - počáteční teplotu eutektické reakce T_{S0}, derivací křivky zvýrazněnou změnu charakteru poklesu teploty T_{S1}, pravděpodobné ukončení tuhnutí při teplotě T_{S2} (v čase t_{S2}) a hodnotu případného podchlazení Δ TE .
Teplotní pole formy bylo sledováno u různých materiálů forem k zvýraznění vlivu grafitizace při dilataci slitiny během tuhnutí a to u zkoušek č.Š35, Š38 – forma JBFS, č. Š36, Š37 -forma CT a č. Š39, Š40, Š41 - kovová forma (kokila) s předehřevem 200 °C viz obrázek č. 66 a v přílohách u uvedených zkoušek.

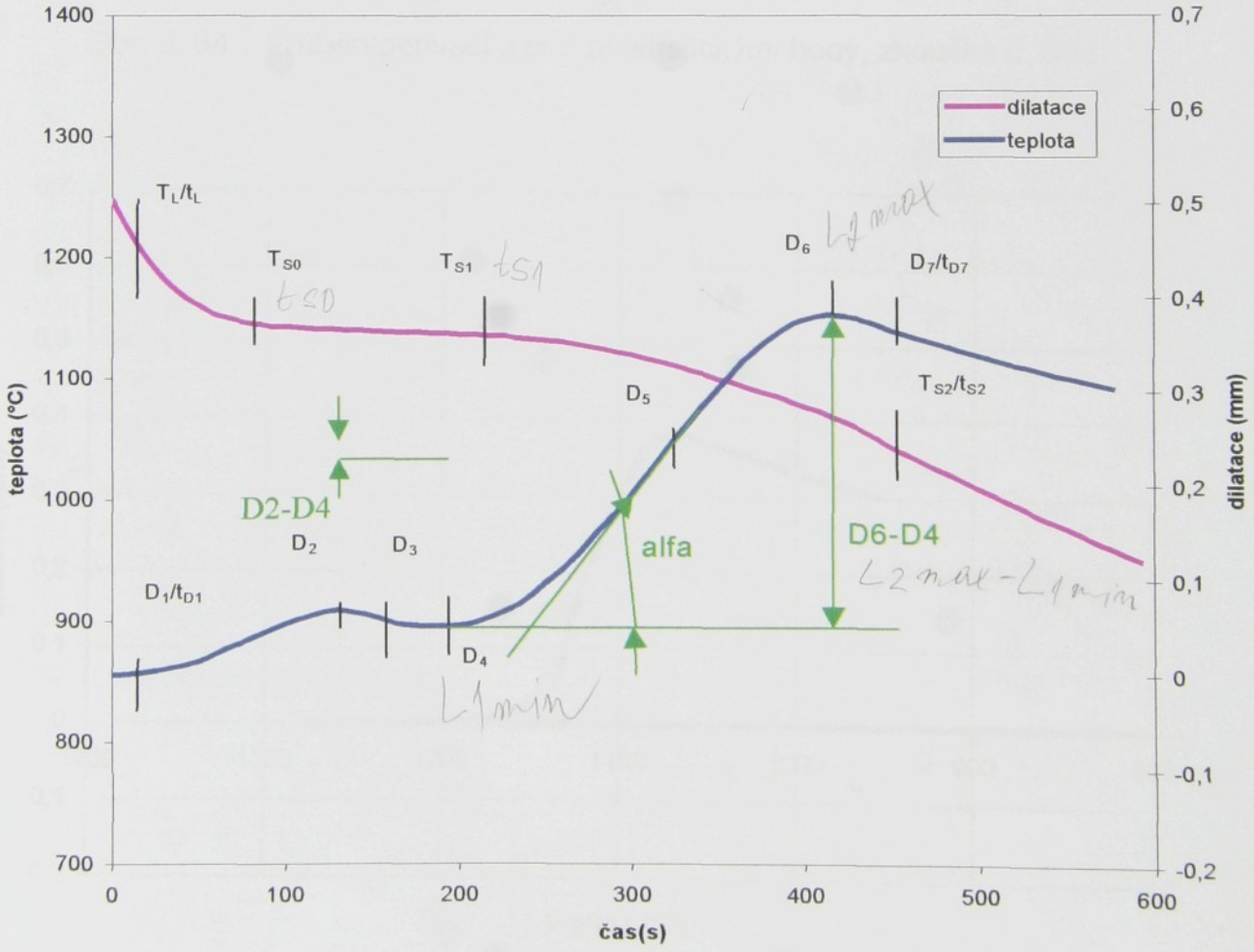
Jako charakteristické dilatační body na získaných křivkách byly evidovány : hodnota D_1 odečtená při dosažení teploty likvidu T_L , první maximum D_2 (v tabulkách jako L_{1max}, v čase t_{1max}), inflexní bod klesající křivky z prvního maxima D_3 , první minimum D_4 (v tabulkách jako L_{1min}, v čase t_{1min}), absolutní hodnota poklesu z prvního maxima $D_2 - D_4$ (v tabulkách jako $L_{1max} - L_{1min}$), úhel stoupání při dosažení druhého maxima α, inflexní bod stoupající křivky před druhým maximem D_5, druhé maximum D_6 (v tabulkách a grafech jako L_{2max} , v čase t_{2max} , při teplotě T_{2max}),

absolutní hodnota druhého maxima $D_6 - D_4$ (v tabulkách a grafech jako hodnota L_{2max} - L_{1min}) , inflexní bod na poklesu křivky z druhého maxima D_7 odpovídající přibližně teplotě T_{S2} .

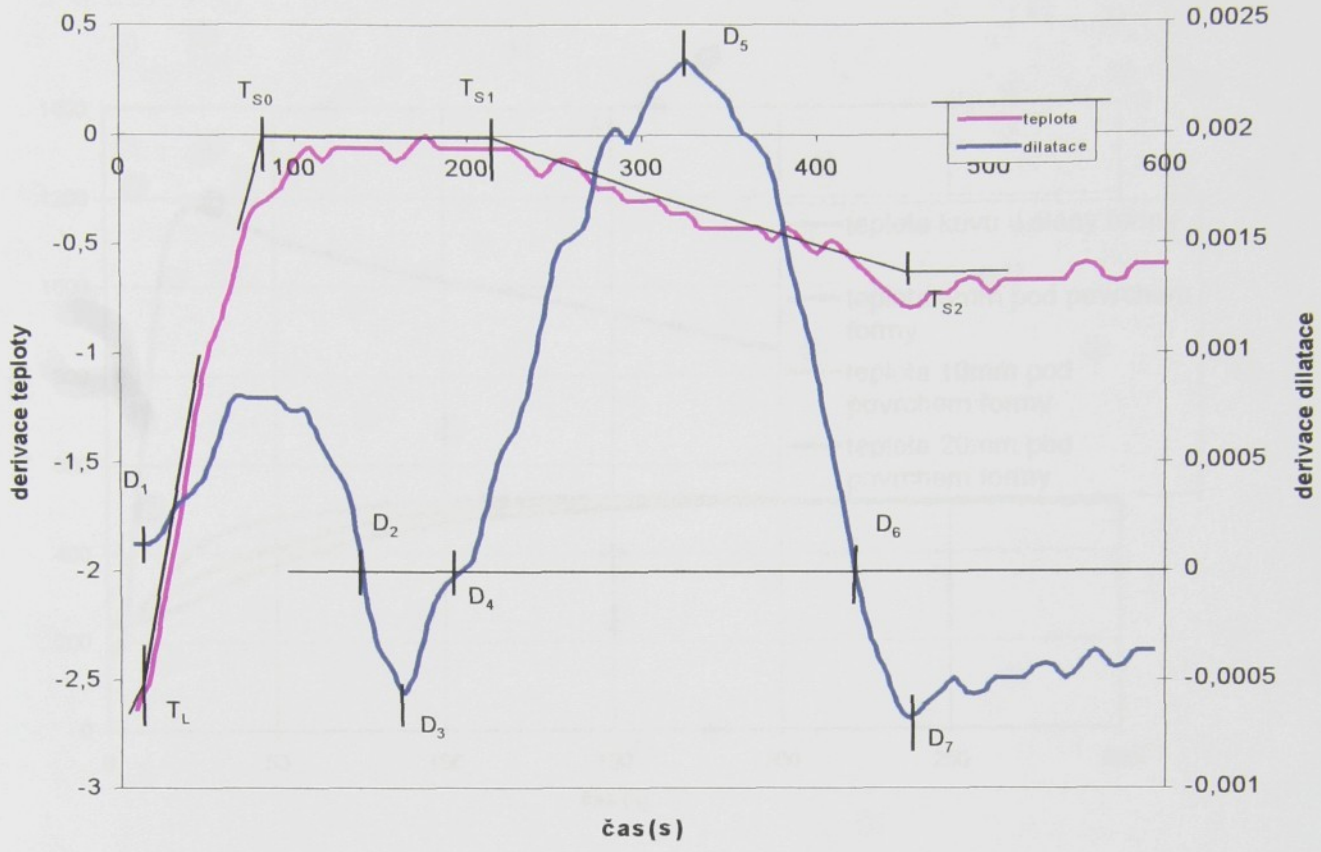
První maximum D_2 (jako L_{1max} , T_{1max}, t_{1max}) odpovídající pravděpodobně roztažení povrchových vrstev formy se u ojedinělých měření neprojevilo a proto nemohlo být odečteno. Na dilatačních křivkách u zkoušek s *válcovou tyčí* se tento vliv jako samostatné maximum neprojevil vůbec a pravděpodobně je obsažen pouze v odlišném úhlu stoupání zjištěného maxima v jeho první fázi. Druhé maximum D_6 (jako L_{2max}, T_{2max}, t_{2max}, úhel α) souvisí s průběhem expanze při krystalizací grafitu, kde se odráží především množství a kvalita zárodků - viz obrázek č. 63 zobrazující charakteristické body na naměřených křivkách, zde konkrétně zkouška č. Š32. Na obrázku č.64 je pak zobrazen průběh derivací s charakteristickými body a obrázek č. 65 zobrazuje průběh identického děje v osách dilatace - teplota.

Vybrané teplotní i dilatační křivky s jejich derivacemi jsou vyobrazeny v příloze spolu s prezentací ostatních (metalografických) výsledků, vždy u dané zkoušky, odečtené hodnoty charakteristických bodů jsou v tabulkách v příloze č.23 a č. 24 -A,B,C.

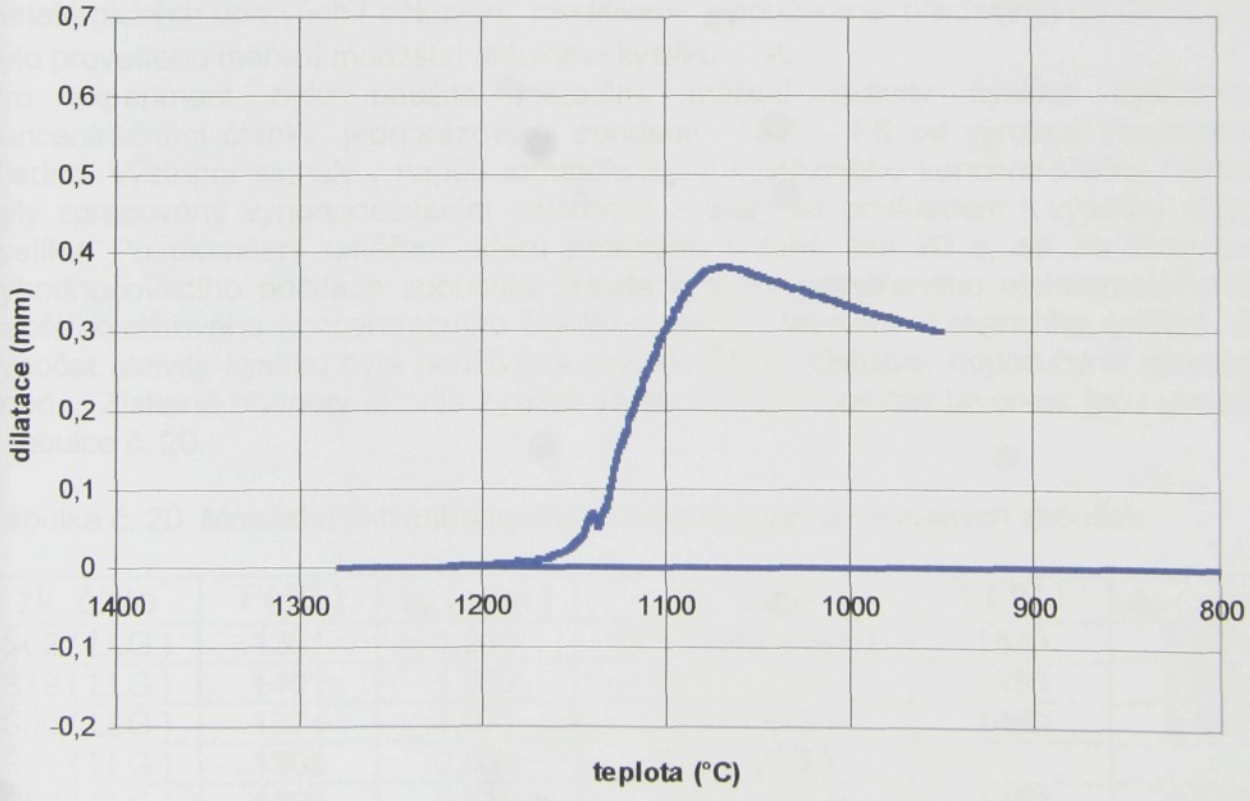
Pro experimentální určení hodnoty tepelné akumulace formy b_f se prováděla měření teplotních polí ve stěně formy, například viz obrázek č. 66 - zkouška č. Š39, kokila předehřátá na 200 °C. Více o této problematice viz kapitola 3.2.4 .



Obr. č. 63 Průběh teploty a dilatace s charakteristickými body, zkouška č.Š32.



Obr. č. 64 Průběh derivací s charakteristickými body, zkouška č. Š32.



Obr. č. 65 Průběh křivky dilatace – teplota zkoušky č. Š32.

Obr. č.66 Měření teplotních polí ve stěně formy, zkouška č. Š39, LLG (kokila, 200 °C).

3.3.6 Měření množství aktivního kyslíku v tavenině litin

Jako doplňující charakteristika ke zhodnocení stavu taveniny po sekundárních metalurgických úpravách (očkování, modifikace), používané především u LČG a LKG, bylo provedeno měření množství aktivního kyslíku – a_o .
Pro experiment byla použita metodika měření aktivity kyslíku kyslíkovými koncentračními články, jednorázovými sondami TSO – FS od výrobce Termosondy Kladno. Výstupní signály (napětí termočlánku a kyslíkového koncentračního článku) byly zpracovány vyhodnocovacím zařízením a staly se podkladem k výpočtu aktivity kyslíku. Po ukončení uměření, které probíhalo v době cca 20 s, se na obrazovce vyhodnocovacího počítače zobrazila aktivita kyslíku, naměřeného elektromotorického napětí kyslíkového koncentračního článku a teplota taveniny v okamžiku měření. Pro výpočet aktivity kyslíku byla používána rovnice ČSAV Ostrava, doporučená výrobcem sond. Získané hodnoty aktivity kyslíku se současnou teplotou taveniny jsou uvedeny v tabulce č. 20.

Tabulka č. 20 Množství aktivního kyslíku v tavenině litin u uvedených zkoušek.

zk. číslo	T (°C)	a_o (ppm)	zk. číslo	T (°C)	a_o (ppm)
Š62 (LLG)	1361	1,218	Š73 (nemod.tav.)	1539	5,800
Š79 (LLG)	1401	1,552	Š74 (LČG)	1450	0,608
Š80 (LLG)	1374	1,071	Š75 (LČG)	1480	0,893
Š81 (LLG)	1308	0,565	Š76 (LČG)	-	-
Š82 (LLG)	1326	0,515	Š77 (LČG)	1462	0,628
Š83 (LLG)	1380	1,728	Š78 (LKG)	1509	2,486

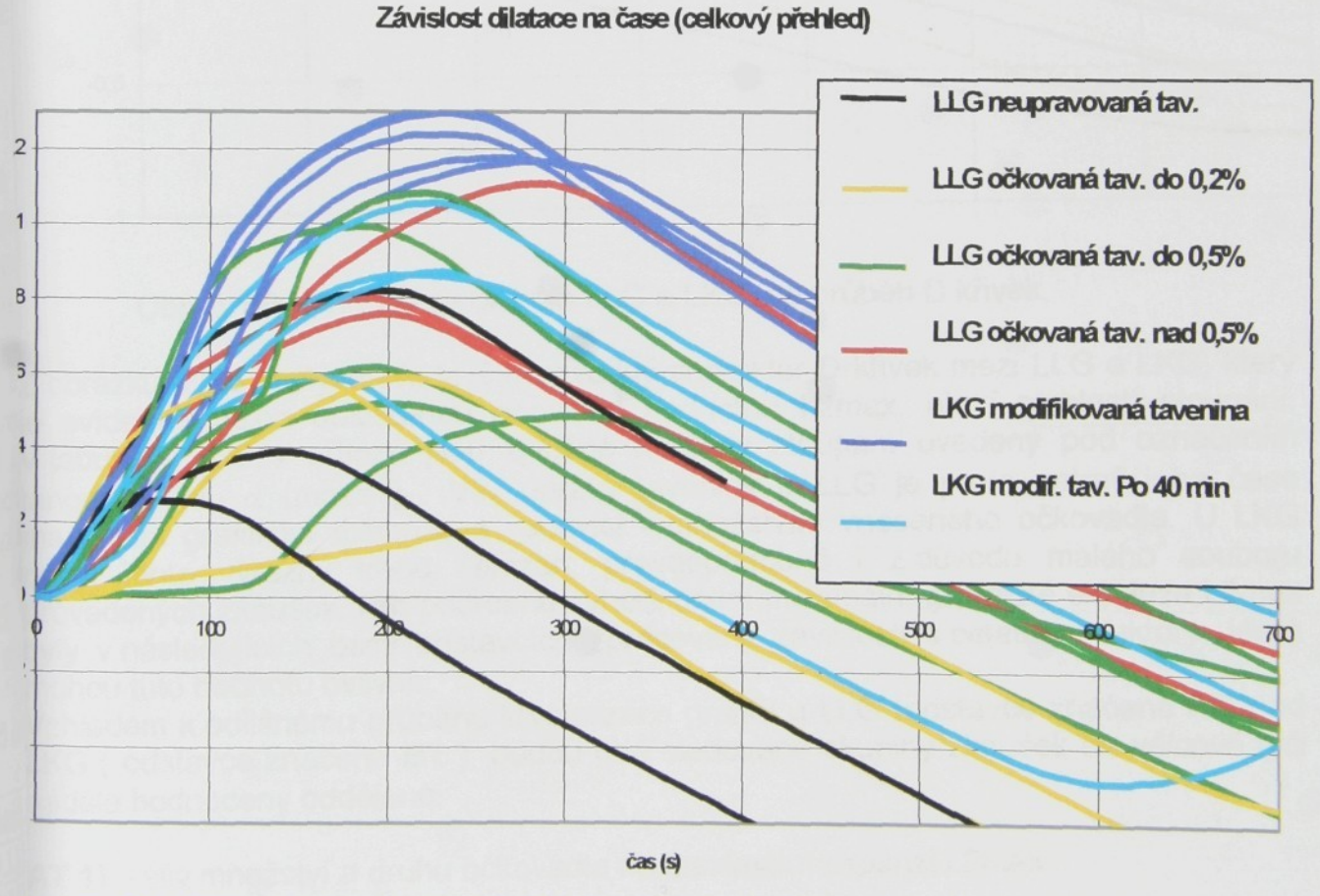
4. Rozbor dosažených výsledků

4.1 Rozbor vlivů na charakter a průběh dilatačních dějů během tuhnutí litin

Jak vyplývá z naměřených časových charakteristik dilatace (dále jen D křivky) a teploty (dále jen T křivky) tuhnoucích litin, jde o děj velice komplikovaný, z matematického hlediska v podstatě představuje polyvariantní systém. Ten je složený z řady dílčích dějů, které zahrnují energetické transportními děje, dilataci materiálu formy, změnu skupenství kovu, difuzní děje ve sledované slitině, stav taveniny po metalurgických úpravách a řadu dalších. Z celého souboru dějů byly sledovány vlivy působící především na vlastní průběh grafitizace litin, jak s lupínkovým, červíčkovým , tak i kuličkovým grafitem.

4.1.1 Rozbor výsledků D a T křivek ze zkoušek s *válcovou tyčí* (*VT*)

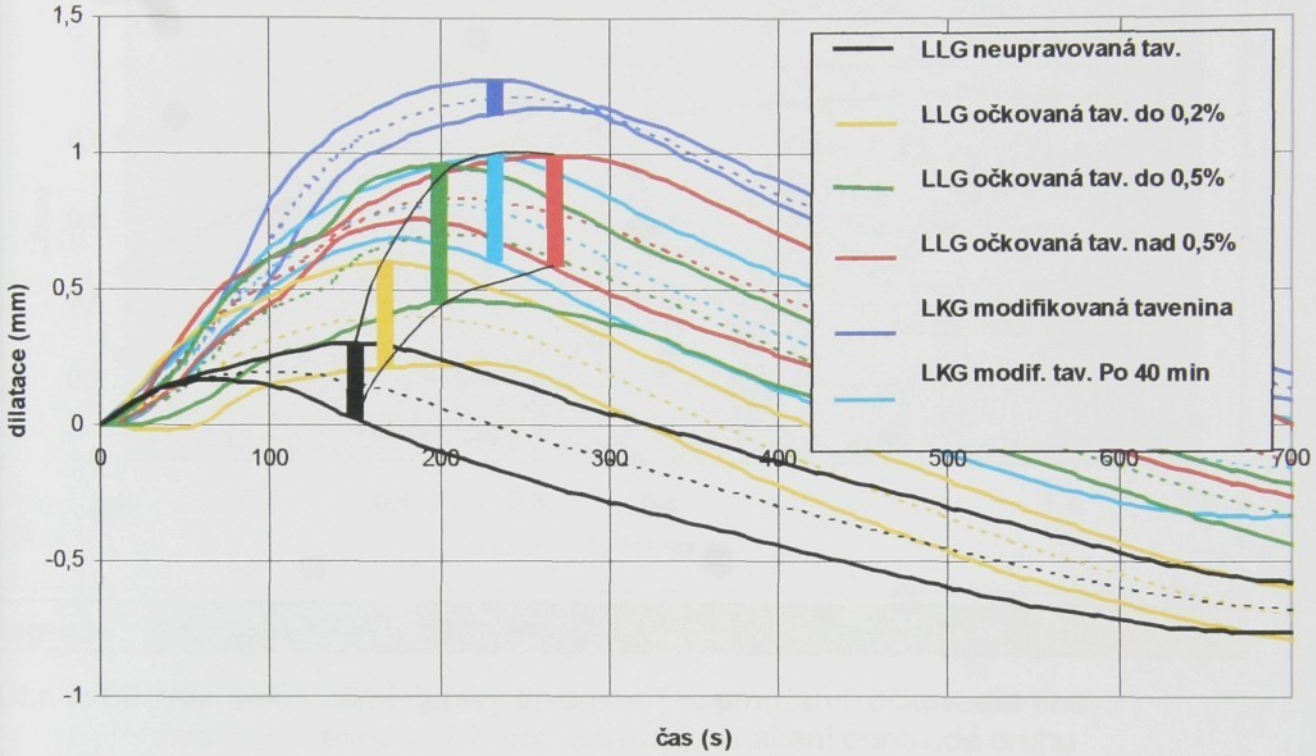
Zkouška s *válcovou tyčí* odlévanou do formy s JBFS (popsáno v kapitole 3.2.1) byla v časové souslednosti první, na které se sledovaly průběhy D a T křivek během tuhnutí různě upravených tavenin LLG a LKG. Celkem bylo provedeno 23 laboratorní a provozní zkoušky, jejichž výsledky jsou zaneseny do tabulky č.23 v příloze. Průběh všech získaných D křivek je v souhrnu na obrázku č. 67.



Obr. č. 67 Porovnání výsledků 23 dilatačních křivek získaných při zkouškách s *válcovou tyčí* .

4.1.1.1 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek VT s LLG

Již z obrázku č.67 je patrný zásadní vliv úpravy taveniny na výsledný průběh D křivek, především v hodnotě grafitické expanze L2max, a to u LLG v závislosti na množství očkovací přísady a u LKG v závislosti na časové prodlevě taveniny po modifikaci. Pro přehlednost uvedeného tvrzení byl celý soubor zkoušek rozdělen do šesti základních oblastí, kterým odpovídá i barevné rozlišení, viz legenda v obrázku. Schématický obrázek č. 68 znázorňuje čárkovaně průměrnou hodnotu a plně směrodatné odchylky daného souboru zkoušek se zvýrazněním oblasti grafitické expanze L2max.



Obr. č. 68 Vliv úprav tavenin LLG a LKG na průběh D křivek.

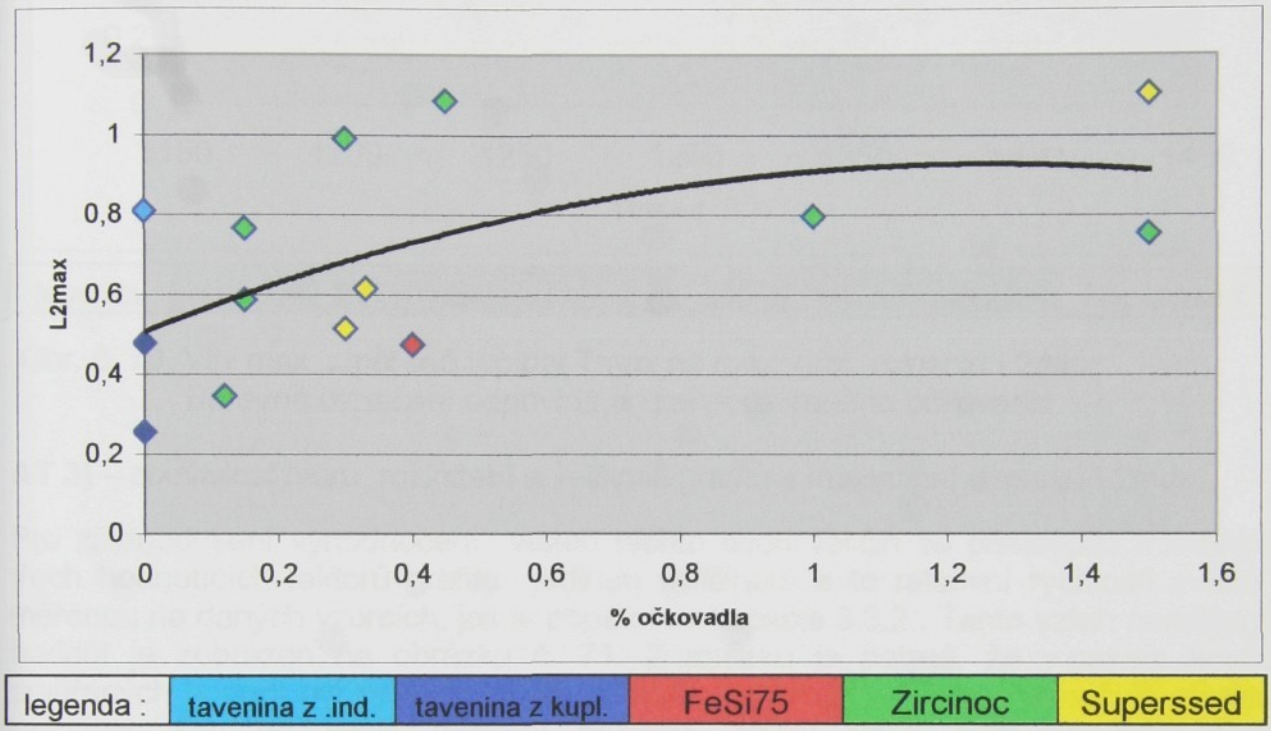
Z obrázku č. 68 vyplývá především rozdílný charakter D křivek mezi LLG a LKG, který je evidentní nejen dosaženou absolutní hodnotou L2max, ale i rychlostí stoupání. V tabulce č. 23 v příloze jsou zjištěné hodnoty stoupání uvedeny pod označením tangenta úhlu α ($mm.s^{-1}$) . Vliv úpravy taveniny u LLG je proto patrný i na čase maximální grafitické expanze a souvisí s množstvím vneseného očkovadla. U LKG nebyl tento výrazný trend nalezen, pravděpodobně i z důvodu malého souboru provedených zkoušek. Pro podrobné vyhodnocení maximální grafitické expanze L2max byly v následujících osmi odstavcích zpracovány závislosti s ostatními faktory, které mohou tuto hodnotu ovlivnit.
Vzhledem k odlišnému průběhu krystalizace grafitu u LLG (odstavce značené **AT**) od LKG (odstavce značené **BT**), budou obě sledované skupiny zkoušek na *válcové tyči* nadále hodnoceny odděleně.

AT 1) – vliv množství a druhu očkovadla na maximální expanzi L2max

Obrázek č. 69 podává přehled, jak o vlivu množství, tak i o vlivu druhu očkovadla na hodnotu L2max. Rozptyl hodnot u neočkované litiny může být pravděpodobně zapříčiněný jednak nedokonalým rozpuštěním většiny zárodků při tavení v kuplovně, jednak vyšší licí teplotou při tavení v indukční peci.

Vliv očkovadla je daleko výraznější do množství 0,5%, než nad touto hodnotou. Tento fakt se dá vysvětlit horším rozpouštěním většího množství očkovadla v 10 kg laboratorní či 30 kg ruční licí pánvi. Je tedy pravděpodobné, že skutečné množství rozpuštěného očkovadla může být o 30 až 50 % nižší, což by ještě více zvýraznilo přímou úměru této vazby. Křivka proložená souborem získaných výsledků má nízkou hodnotu spolehlivosti R^2, (Y - L2max, x - % množství očkovadla) :

$$Y = 0{,}2635.x^2 + 0{,}6653.x + 0{,}5069 \qquad R^2 = 0{,}31 \qquad (46)$$

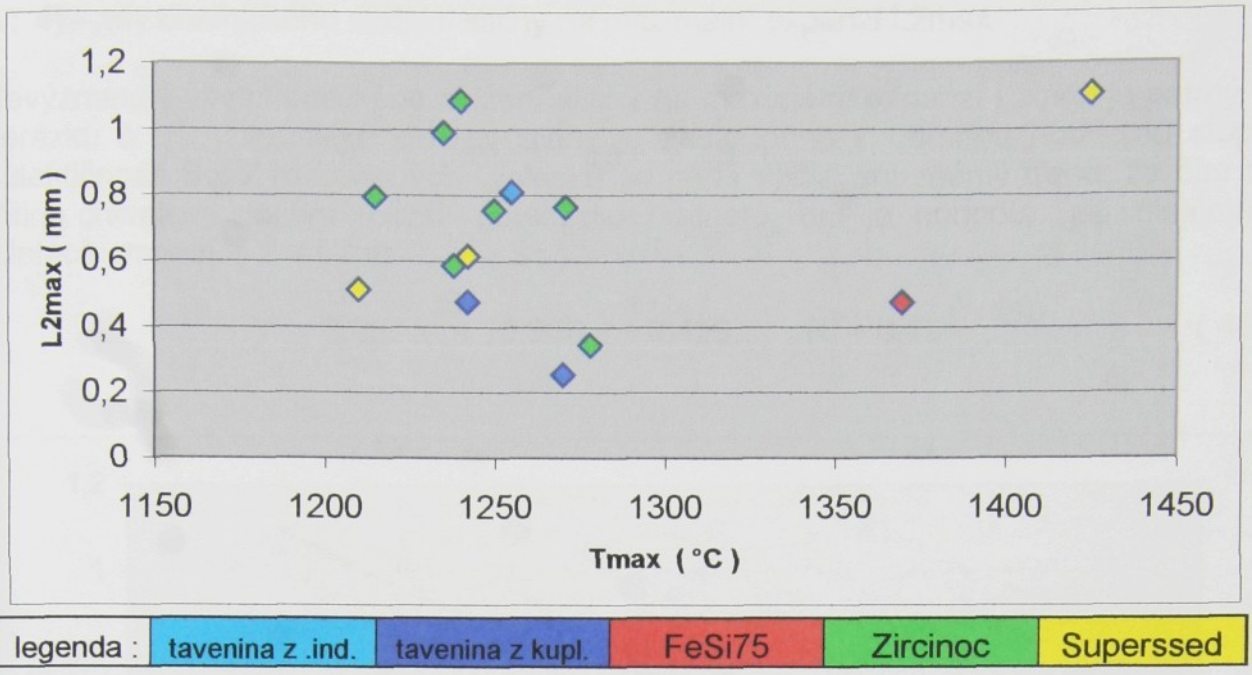


Obr. č. 69 Vliv sekundární úpravy taveniny (% množství očkovadla) na maximální expanzi L2max. Barevné označení odpovídá druhu používaného očkovadla.

Pro hodnocení vlivu druhu očkovadla má uvedený soubor nedostatečné množství údajů. Dá se pouze vyjádřit souhlas se současným trendem používání nových očkovadel na bázi nosič + Sr, Zr,KVZ..., která jsou již při malém množství razantnější spolu s delším trváním očkovacího efektu, než očkovadla klasická na bázi FeSi + Ca,Al.

AT 2) – vliv licí teploty na maximální expanzi L2max

Dalším z posuzovaných vlivů na hodnotu L2max je licí teplota, zastoupená maximální naměřenou teplotou Tmax na T křivkách, viz obrázek č. 70. Z praxe je známo, že licí teplota taveniny (teplota upravené taveniny v licí pánvi) je vyšší zhruba o 80 až 120 °C, než maximální teplota změřená ve formě během jejího plnění. Z obrázku č. 70 je patrné, že zhruba do teploty 1300 °C (teplota naměřená v dutině formy) nebyl nalezen vztah mezi Tmax a L2max. Ojedinělé hodnoty mohou naznačovat výraznější vliv teploty teprve nad touto hodnotou.
Toto zjištění vede k předpokladu, že v praxi bude mít na L2max pravděpodobně výraznější (mírně pozitivní) vliv licí teplota vyšší jak 1400 °C.

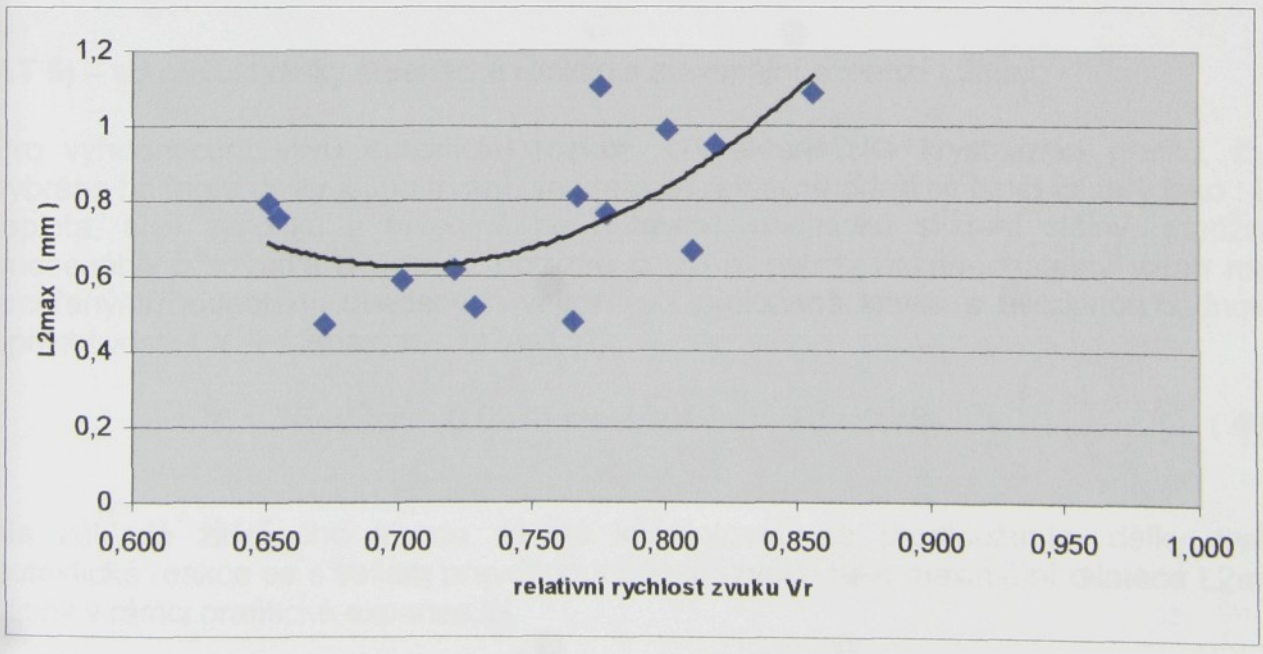


Obr. č. 70 Vliv max. změřené teploty Tmax na max. graf. expanzi L2max. Barevné označení odpovídá druhu používaného očkovadla.

AT 3) – souvislost tvaru, rozložení a velikosti grafitu s maximální expanzí L2max

Pro zjednodušení vyhodnocení vazeb těchto dvou veličin se přistoupilo k nahrazení třech hodnotících faktorů grafitu jedinou veličinou, a to relativní rychlostí zvuku Vr měřenou na daných vzorcích, jak je popsáno v kapitole 3.3.2 . Tento vztah naměřených hodnot je zobrazen na obrázku č. 71. Z obrázku je patrné, že v našem souboru změřených hodnot byl nalezen relativní vztah a proložená křivka naznačuje zřetelnou tendenci, kdy při vyšší relativní rychlosti zvuku Vr (relativně lepší kvalita zkrystalizovaného grafitu) vykazovalo měření větší maximální dilatační expanzi tuhnoucí slitiny, (Y – L2max, x – Vr)

$$Y = 21{,}88.x^2 - 30{,}787.x + 11{,}455 \qquad R^2 = 0{,}44 \qquad (47)$$

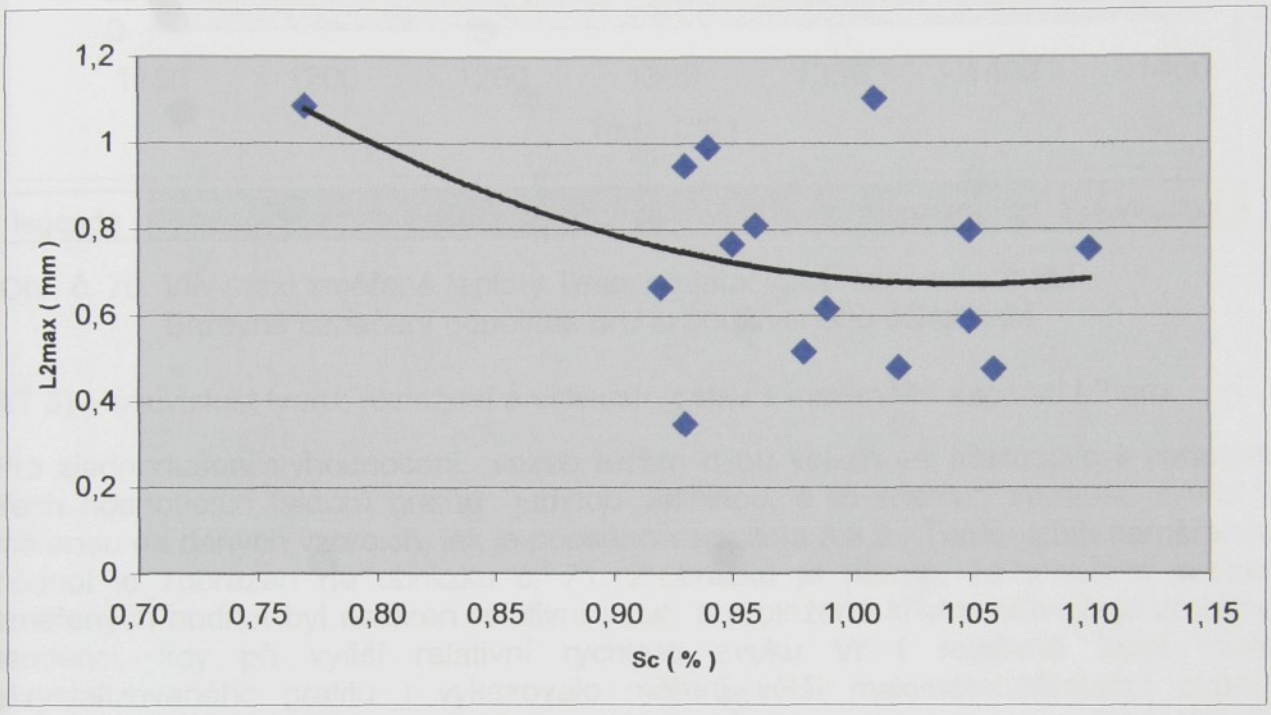


Obr. č. 71 Souvislost tvaru,rozložení a velikosti grafitu (nahrazeno veličinou relativní rychlosti zvuku Vr) na maximální expanzi L2max.

AT 4) – vliv chemického složení slitiny na maximální expanzi L2max

Nevýznamný vliv chemického složení slitiny na maximální expanzi L2max je patrný na obrázku č. 72. Chemické složení slitiny je zastoupeno souhrnnou hodnotou stupně eutektičnosti Sc. Z rozptýlených výsledků se nedá vyčíst ani známý trend, že čím má slitina chemické složení bližší eutektické hodnotě, tím je hodnota její maximální dilatace menší. (Y – L2max , x - Sc)

$$Y = 5{,}257.x^2 - 10{,}968.x + 6{,}426 \qquad R^2 = 0{,}19 \qquad (48)$$



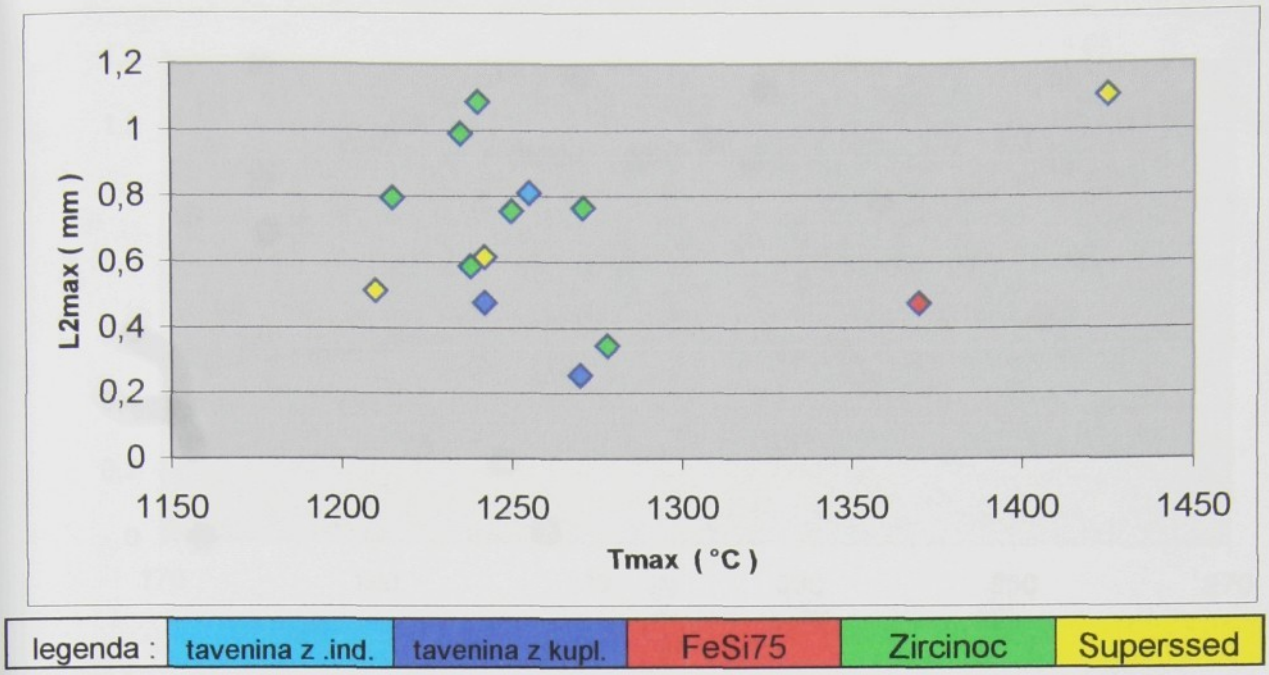
Obr. č. 72 Vliv chemického složení (nahrazeno souhrnnou hodnotou Sc) na maximální expanzi L2max.

AT 5) – souvislost délky eutektické reakce s maximální expanzí L2max.

Pro vyhodnocení vlivu eutektické reakce, charakteristické krystalizací grafitu, byla vybrána hodnota délky jejího trvání, ve které se relativně odrážejí další faktory jako : licí teplota, stav zárodků v tavenině po natavení, chemické složení slitiny, množství vneseného očkovadla a další. Z obrázku č. 73 je patrný nezanedbatelný vztah mezi změřenými hodnotami uvedených veličin, viz proložená křivka s uvedenou hodnotou spolehlivosti, (Y – L2max, x – ts2-ts1) :

$$Y = 7E\text{-}0{,}5x^2 - 0{,}0223.x + 2{,}3043 \qquad R^2 = 0{,}48 \qquad (49)$$

Na základě zjištěného trendu se dá konstatovat, že prodloužením délky trvání eutektické reakce se s velkou pravděpodobností zvětší také maximální dilatace L2max slitiny v rámci grafitické expanze.

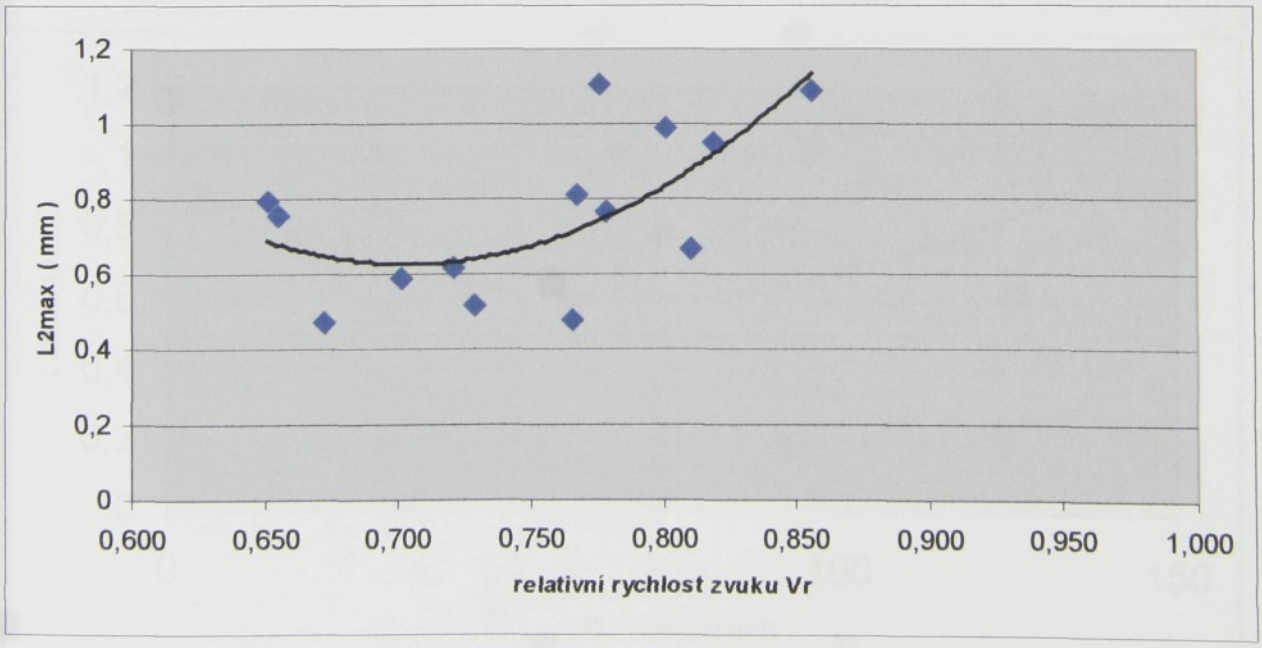


Obr. č. 70 Vliv max. změřené teploty Tmax na max. graf. expanzi L2max. Barevné označení odpovídá druhu používaného očkovadla.

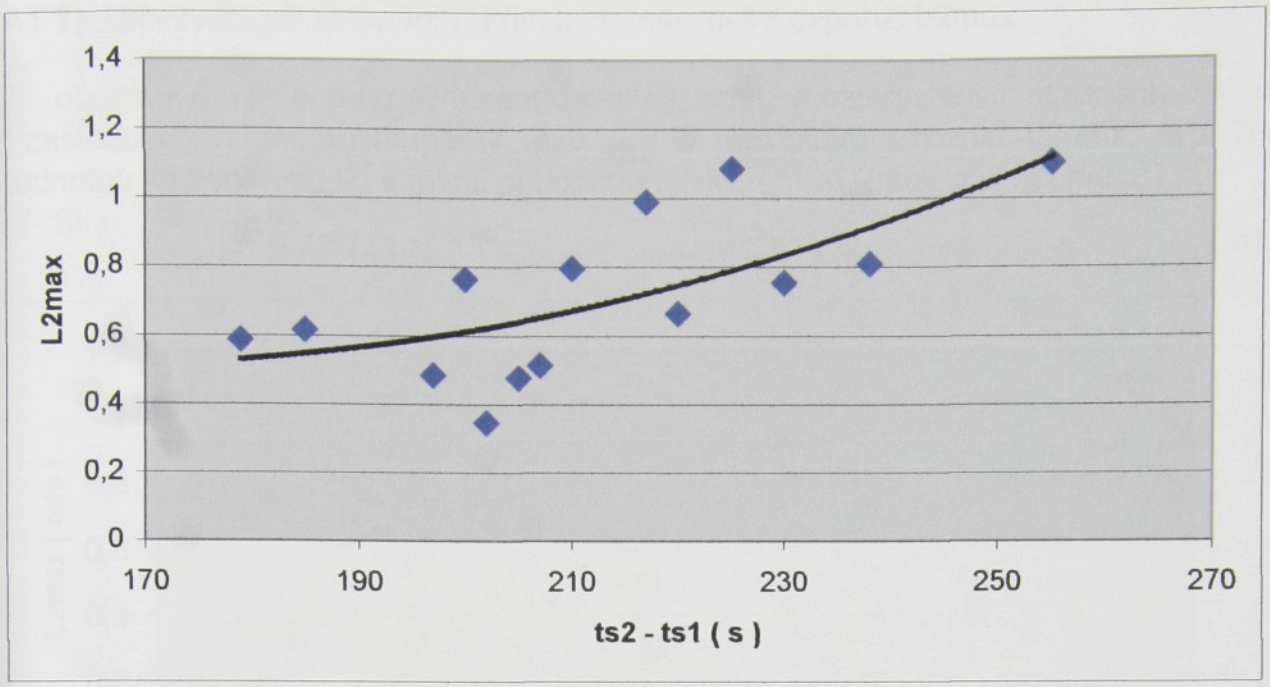
AT 3) – souvislost tvaru, rozložení a velikosti grafitu s maximální expanzí L2max

Pro zjednodušení vyhodnocení vazeb těchto dvou veličin se přistoupilo k nahrazení třech hodnotících faktorů grafitu jedinou veličinou, a to relativní rychlostí zvuku Vr měřenou na daných vzorcích, jak je popsáno v kapitole 3.3.2 . Tento vztah naměřených hodnot je zobrazen na obrázku č. 71. Z obrázku je patrné, že v našem souboru změřených hodnot byl nalezen relativní vztah a proložená křivka naznačuje zřetelnou tendenci, kdy při vyšší relativní rychlosti zvuku Vr (relativně lepší kvalita zkrystalizovaného grafitu) vykazovalo měření větší maximální dilatační expanzi tuhnoucí slitiny, (Y – L2max, x – Vr)

$$Y = 21{,}88.x^2 - 30{,}787.x + 11{,}455 \qquad R^2 = 0{,}44 \qquad (47)$$



Obr. č. 71 Souvislost tvaru,rozložení a velikosti grafitu (nahrazeno veličinou relativní rychlosti zvuku Vr) na maximální expanzi L2max.



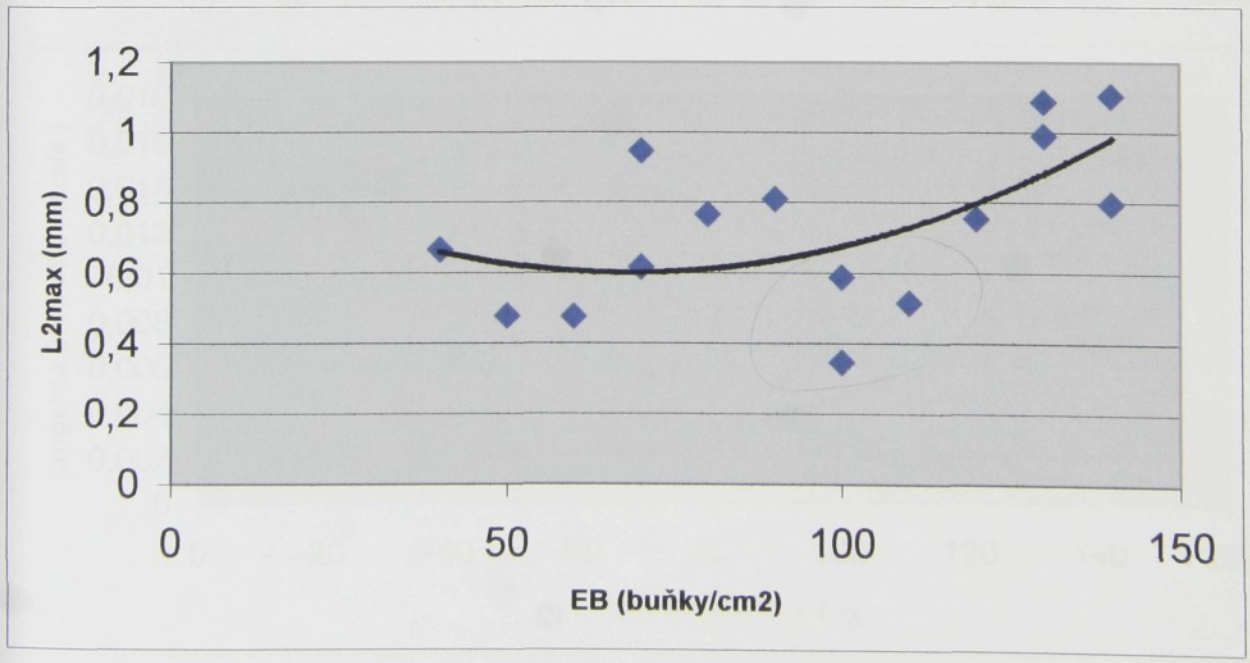
Obr. č. 73 Souvislost délky eutektické reakce s maximální expanzí L2max.

AT 6) – vliv počtu eutektických buněk na maximální expanzi L2max

Vliv počtu eutektických buněk na maximální dilataci L2max je patrný na obrázku č. 74. Ani tento soubor zjištěných dat nevykazuje výraznou spojitost. Z obrázku se dá, na základě nízké hodnoty spolehlivosti R^2, pouze usuzovat naznačený trend, kdy větší počet eutektických buněk odpovídá větší maximální expanzi L2max (Y – L2max, x – EB/cm^2) :

$$Y = 7E - 05.x^2 - 0{,}0101.x + 0{,}9454 \qquad R^2 = 0{,}36 \qquad (50)$$

Zajímavou část grafu tvoří množství 100 – 120 eutektických buněk, která odpovídá oblasti s nejmenšími hodnotami maximální expanze L2max.

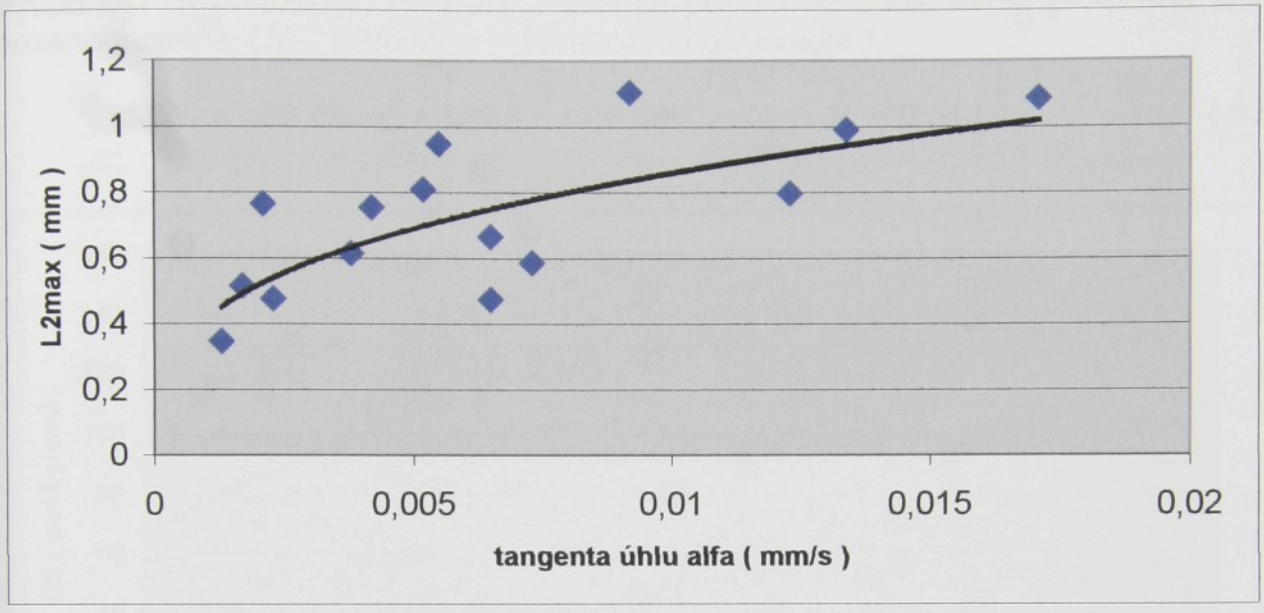


Obr. č. 74 Vliv počtu eutektických buněk na maximální expanzi L2max.

AT 7) – vliv rychlosti stoupání D křivek na maximální expanzi L2max

Na obrázku č. 75 je patrný nezanedbatelný vztah mezi rychlostí stoupání D křivek (zastoupený hodnotou tangenty úhlu α) a maximální expanzí L2max, vyjádřený hodnotou spolehlivosti R^2 v rámci proložené křivky, (Y – L2max, x – tg úhlu α) :

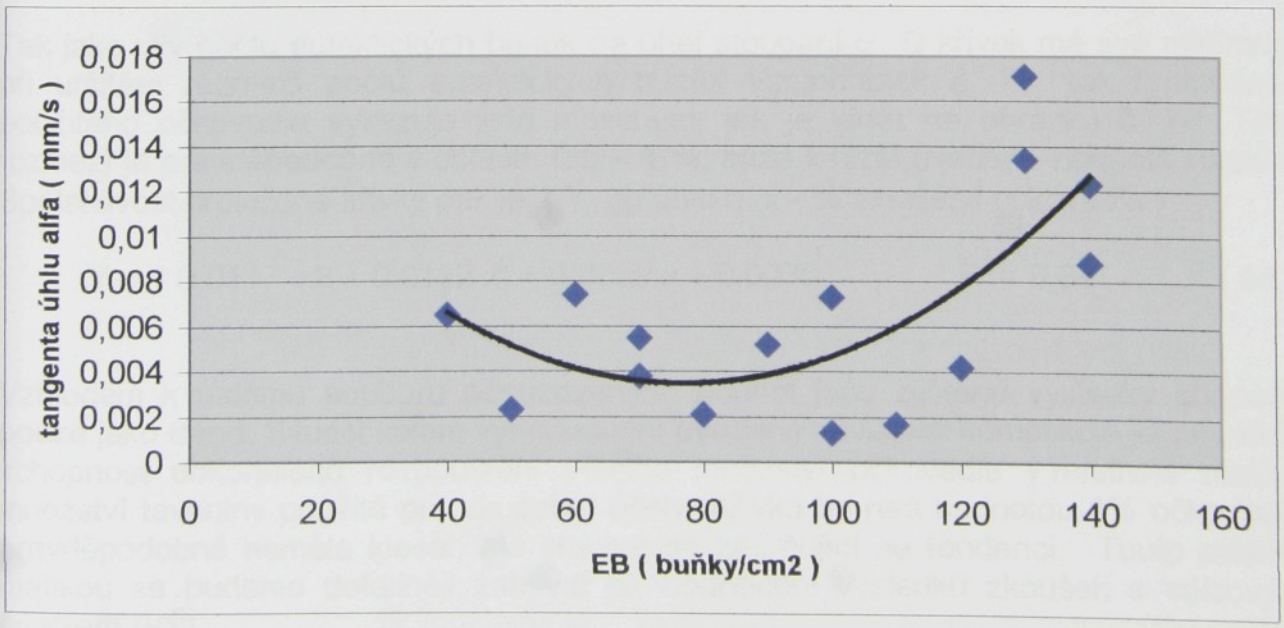
$$Y = 3{,}6771.x^{0{,}3158} \qquad R^2 = 0{,}52 \qquad (51)$$



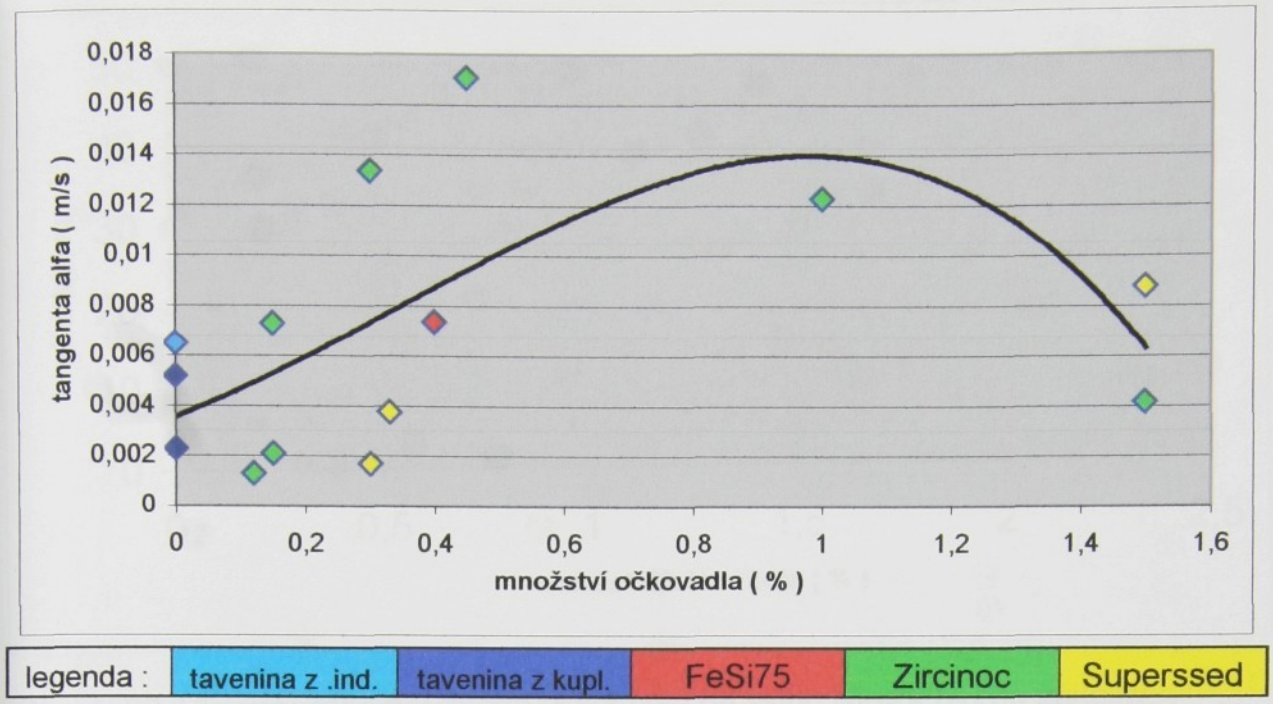
Obr.č. 75 Vliv rychlosti stoupání D křivek vyjádřený tangentou úhlu α na L2max

Ze zjištěné relativní závislosti se dá usuzovat na vzájemně podobný tepelný uzel mezi jednotlivými provedenými zkouškami v rámci jednotné konstrukce zkušebního odlitku *válcové tyče*, který vymezuje sledovaný děj především na eutektickou krystalizaci. Toto tvrzení podporuje vzájemná vazba mezi počtem eutektických buněk a rychlostí stoupání D křivek na obrázku č. 76. Ani tato spolehlivost v rámci proložené křivky již není zanedbatelná, (Y – tg úhlu α , x – EB/cm^{2}):

$$Y = 2E\text{-}06.x^2 - 0{,}0004.x + 0{,}0172 \qquad R^2 = 0{,}49 \qquad (52)$$



Obr. č. 76 Vliv počtu eutektických buněk na rychlosti stoupání D křivek.

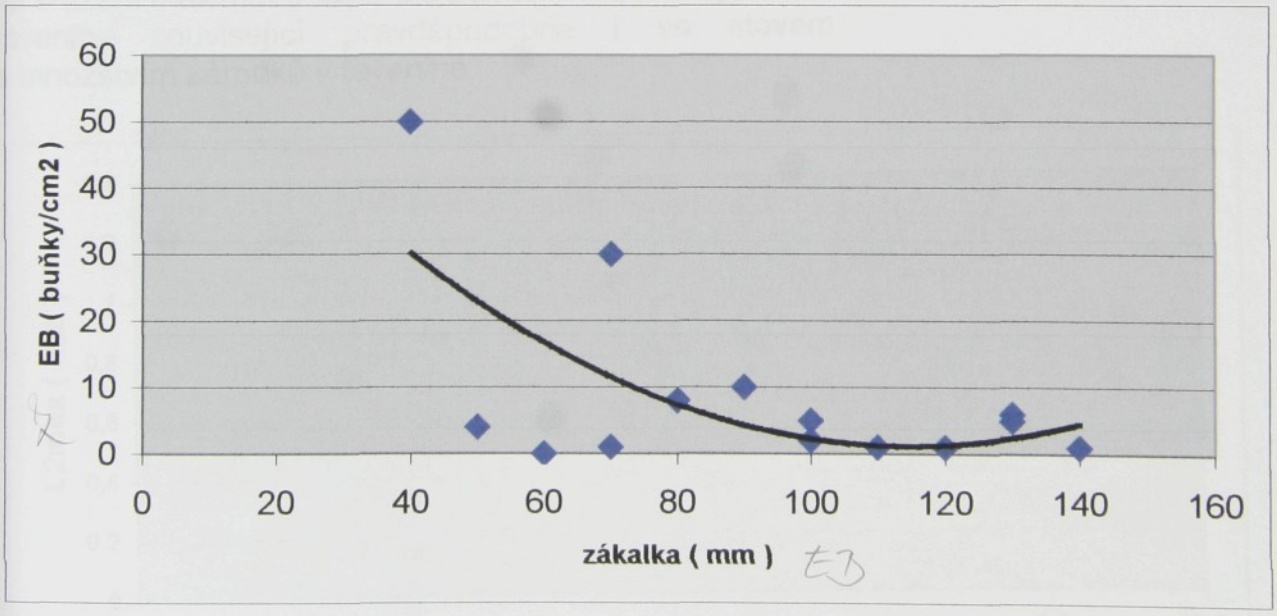


Obr. č. 78 Vliv množství očkovadla na rychlost stoupání D křivek.
Barevné označení odpovídá druhu použitého očkovadla.

AT 8) – vliv množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce

Zajímavá závislost na počtu eutektických buněk byla zjištěna u schopnosti litiny tvořit zákalku při stejnojmenné zkoušce, viz obrázek č.79. Spolehlivost proložené křivky se pohybuje na úrovni trendu, (Y – zákalka, x – EB/cm^2) :

$$Y = 0{,}0052.x^2 - 1{,}1968.x + 69{,}636 \qquad R^2 = 0{,}40 \qquad (55)$$



Obr. č. 79 Vliv počtu eutektických buněk na sklon litiny k tvorbě zákalky.

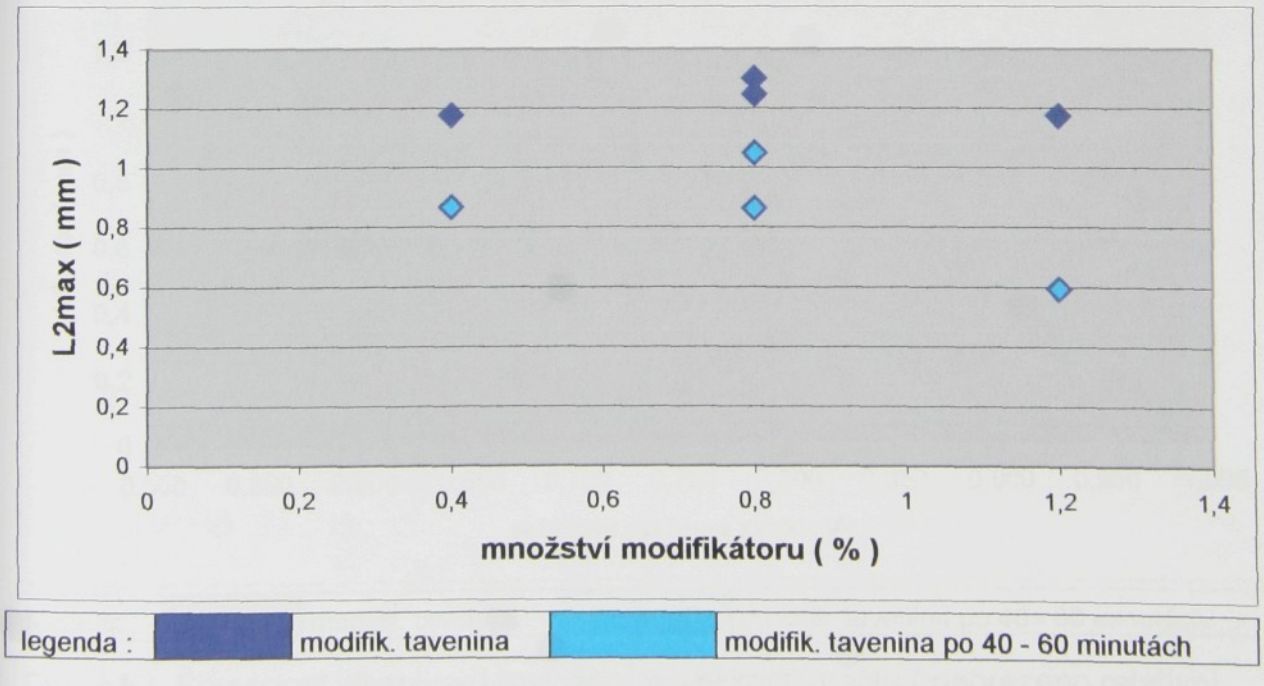
Z obrázku je patrné, že i zde platí zjištěná hranice - minimální množství 100 eutektických buněk, nad kterou již nevykazují zkoušky výraznou zákalku. Tuto relativní závislost potvrzuje i obrázek č. 80 na kterém je patrná výrazná závislost sklonu taveniny k zákalce vzhledem k množství použitého očkovadla.

Obr. č. 80 Vliv množství použitého očkovadla na sklon litiny k tvorbě zákalky.

4.1.1.2 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek VT s LKG

BT 1) – vliv množství modifikátoru na maximální expanzi L2max

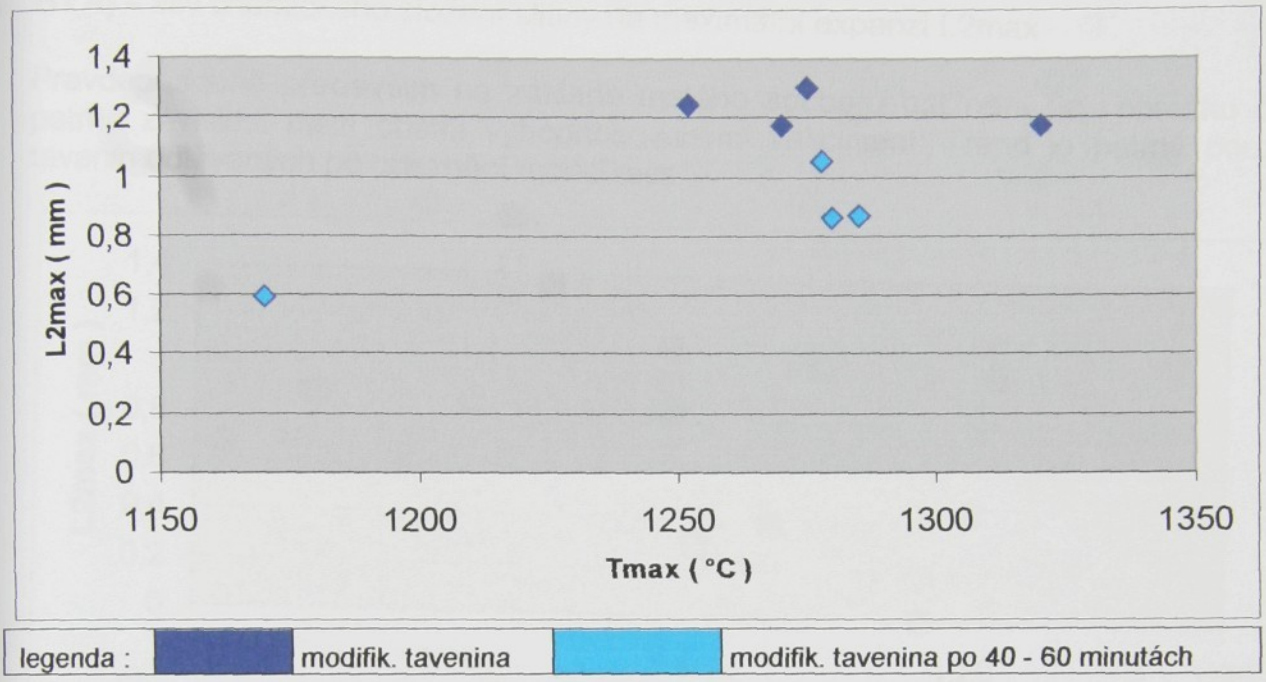
Na základě malého počtu měření se nedá z obrázku č. 81 usuzovat na měřitelnou závislost mezi množstvím modifikátoru a maximální grafitickou expanzi L2max. Uvedeným problémem se zabývá kapitola 4.1.2.2 při vyhodnocení obsáhlejšího souboru zkoušek s *válcovým špalkem* (*VŠ*).
Na co ale obrázek jednoznačně ukazuje, je vliv prodlevy modifikovaných tavenin LKG na snížení maximální expanze L2max , což je projevem odeznění modifikačního stavu taveniny související pravděpodobně i se stavem
a množstvím zárodků v tavenině.



Obr. č. 81 Závislost množství modifikátoru při úpravě taveniny na maximální expanzi grafitu L2max u LKG.

BT 2) – vliv licí teploty na maximální expanzi L2max

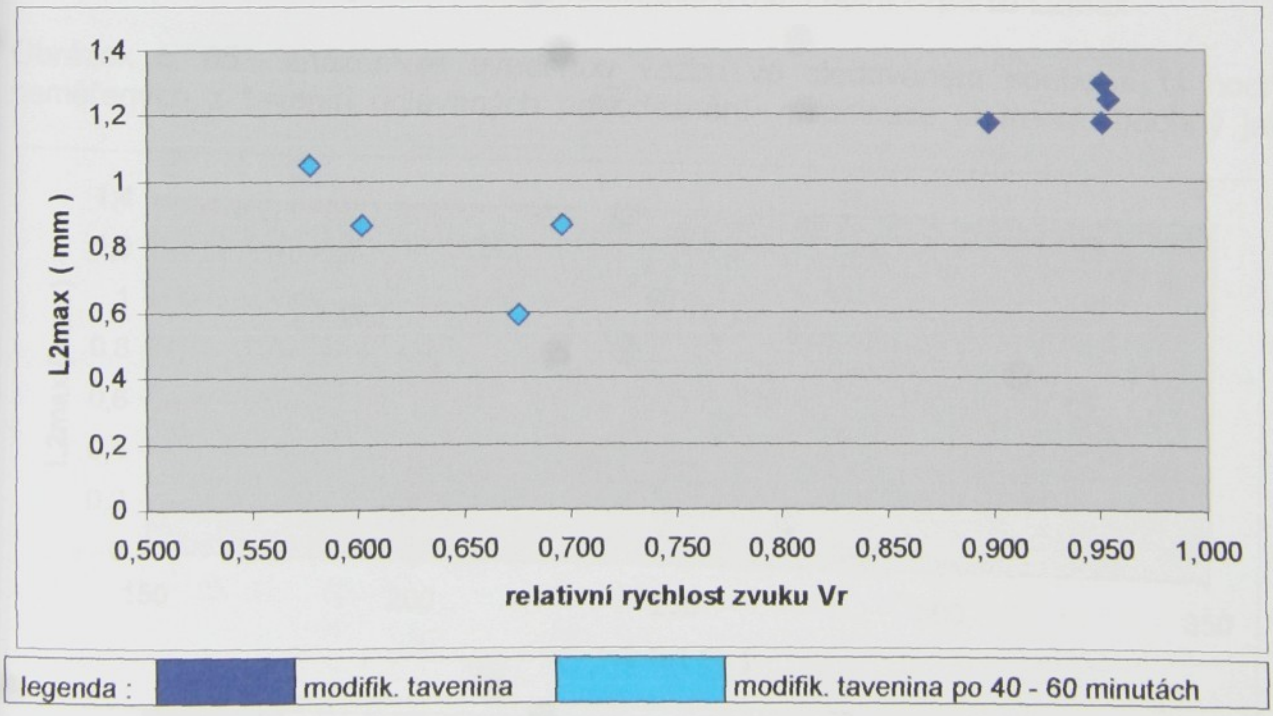
Jak je zřejmé z obrázku č. 82, má na maximální expanzi grafitu výraznější vliv stav taveniny (pravděpodobně množství vhodných zárodků) než licí teplota, která je v praxi asi o 100 až 150 °C vyšší, než teplota Tmax změřená termočlánkem v dutině odlitku při jeho odlévání.



Obr. č. 82 Závislost maximální licí teploty na maximální expanzi grafitu L2max.

BT 3) – souvislost tvaru, rozložení a velikosti grafitu s maximální expanzí L2max

I v tomto případě byla složitá charakteristika grafitu nahradila jediným číslem a to relativní rychlostí zvuku Vr měřenou na daných vzorcích, jak je popsáno v kapitole 3.3.2

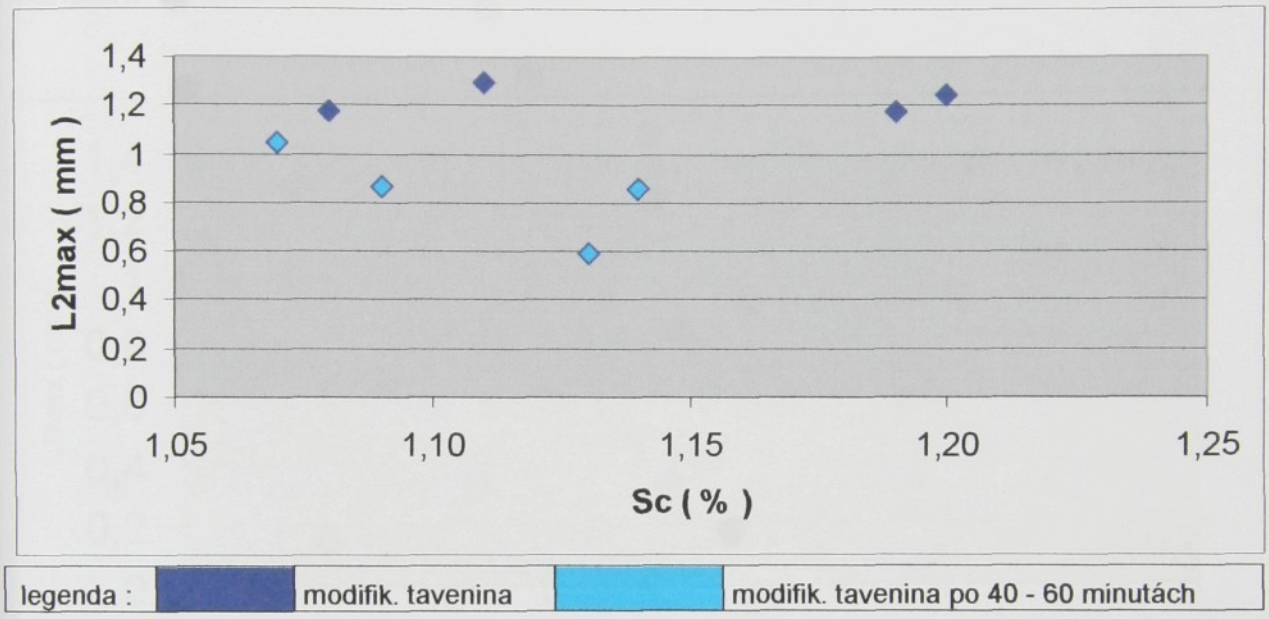


Obr. č.83 Souvislost vlivu tvaru,rozložení a velikosti grafitu (nahrazeno relativní rychlostí zvuku Vr) s maximální expanzi L2max u LKG.

Vzhledem k malému souboru posuzovaných hodnot nelze vyhodnotit tuto závislost uspokojivým způsobem. Obrázek č. 83 naznačuje, že tvar grafitu bude mít pravděpodobně výrazný vliv na maximální expanzi grafitu L2max. Uvedeným problémem se zabývá daná kapitola při vyhodnocení obsáhlejšího souboru zkoušek s *válcovým špalkem* (*VŠ*).

BT 4) – vliv chemického složení slitiny na maximální expanzi L2max

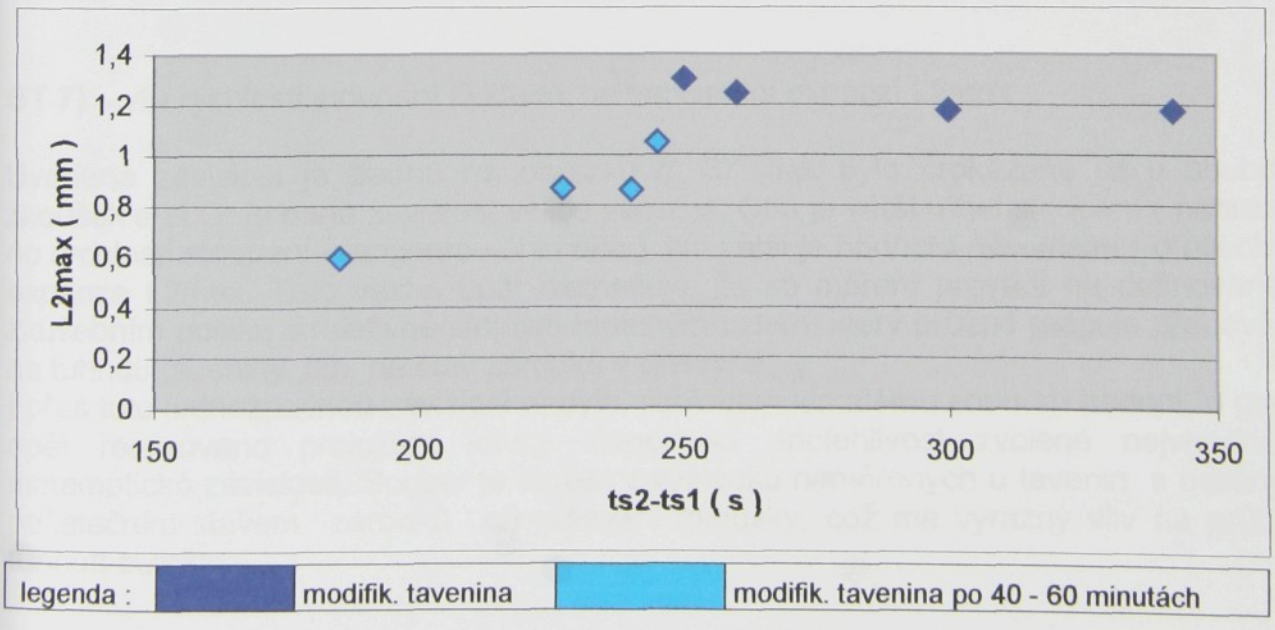
Pravděpodobně především na základě malého souboru dat není na obrázku č. 84 patrná závislost mezi oběmi vyhodnocovanými veličinami. Trend je patrný pouze u tavenin odlévaných po odeznění modifikace.



Obr. č. 84 Vliv chemického složení na maximální expanzi L2max u LKG.

BT 5) – souvislost délky eutektické krystalizace s maximální expanzí L2max

Obrázek č. 85 znázorňuje uvedenou vazbu ve sledovaném souboru. U hodnot naměřených z tavenin odlévaných po odeznění modifikace je trend obdobný jako

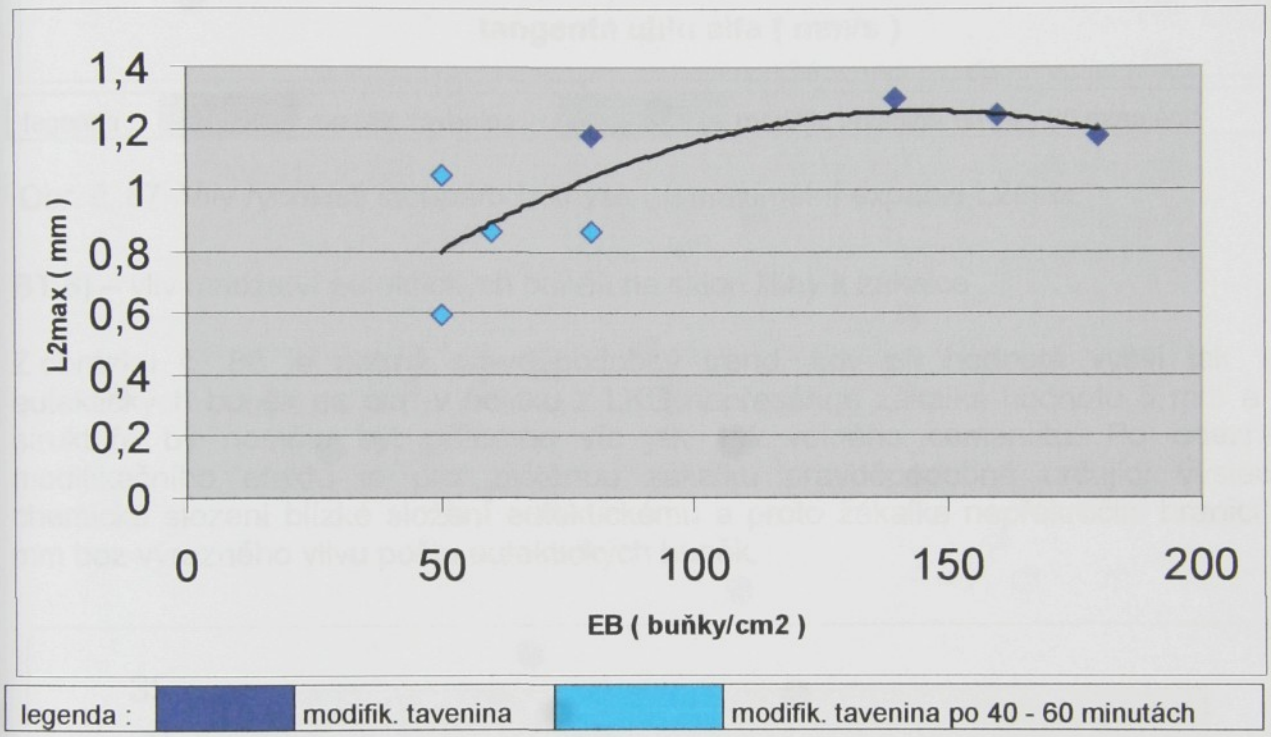


Obr. č. 85 Souvislost délky eutektické reakce s maximální expanzi L2max.

u LLG, kdežto u LKG je trend opačný. Tato souvislost bude detailně vyhodnocena při zpracování souboru zkoušek *válcového špalku* (*VŠ*).

BT 6) – vliv počtu eutektických buněk na maximální expanzi L2max

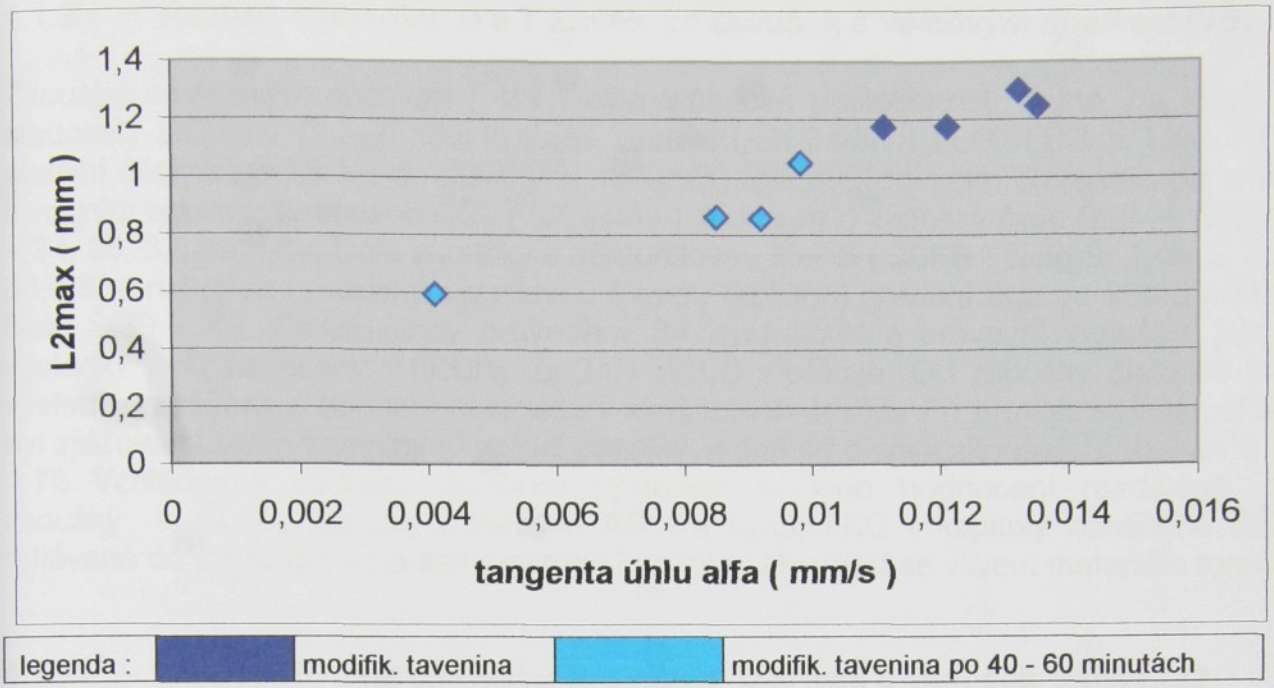
Z obrázku č. 86 je patrný vliv množství eutektických buněk na maximální grafitickou expanzi L2max. Tato vazba jednoznačně souvisí se stavem a počtem zárodků v modifikované tavenině, v našem případě byl záměrně posuzován i stav taveniny po odeznění modifikace. I zde se nabízí spekulace s hodnotou okolo 100 až 150 eutektických buněk, v tomto případě však ve vztahu k maximálně naměřeným hodnotám L2max.



Obr. č. 86 Vliv počtu eutektických buněk na maximální expanzi L2max.

BT 7) – vliv rychlosti stoupání D křivek na maximální expanzi L2max

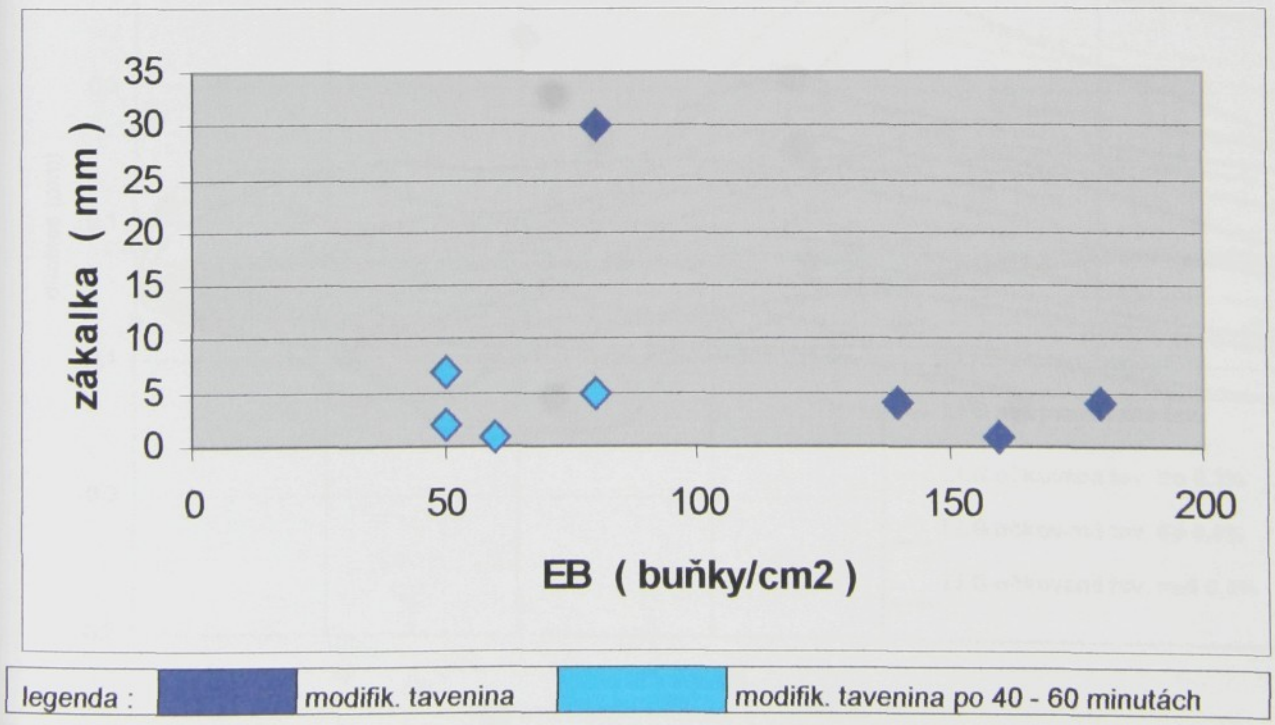
Uvedená závislost je patrná na obrázku č. 87. Jak bylo prokázáno již u souboru zkoušek s LLG, je daná závislost velice výrazná. Čím je větší úhel stoupání (nahrazeno rychlostí stoupání - tangentou úhlu alfa), tím větší je hodnota maximální (grafitické) expanze L2max. Tato vazba opět naznačuje, že se měření provádí na definovaném zkušebním odlitku s relativně stejným tepelným uzlem, který pružně reaguje především na tuhnutí taveniny, tzn. na stav zárodků v tavenině.
I přes tuto jednoznačnou závislost nebylo, vzhledem k malému souboru hodnot, u grafu opět realizováno proložení křivky stanovující spolehlivost zvolené nejvhodnější matematické závislosti. Soubor je složen z výsledků naměřených u tavenin s odlišným počátečním stavem zárodků při odlévání zkoušky, což má výrazný vliv na průběh tuhnutí eutektika.



Obr. č. 87 Vliv rychlosti stoupání D křivek na maximální expanzi L2max.

BT 8) – vliv množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce

Z obrázku č. 88 je patrný pravděpodobný trend, kdy při hodnotě vyšší jak 100 eutektických buněk na cm^2 v odlitku z LKG nepřesáhne zákalka hodnotu 5 mm a ve struktuře by nemělo být přítomno víc jak 1% volného cementitu. Po odeznění modifikačního efektu je pro zjištěnou zákalku pravděpodobně určující výsledné chemické složení blízké složení eutektickému a proto zákalka nepřekročila hranici 10 mm bez výrazného vlivu počtu eutektických buněk.



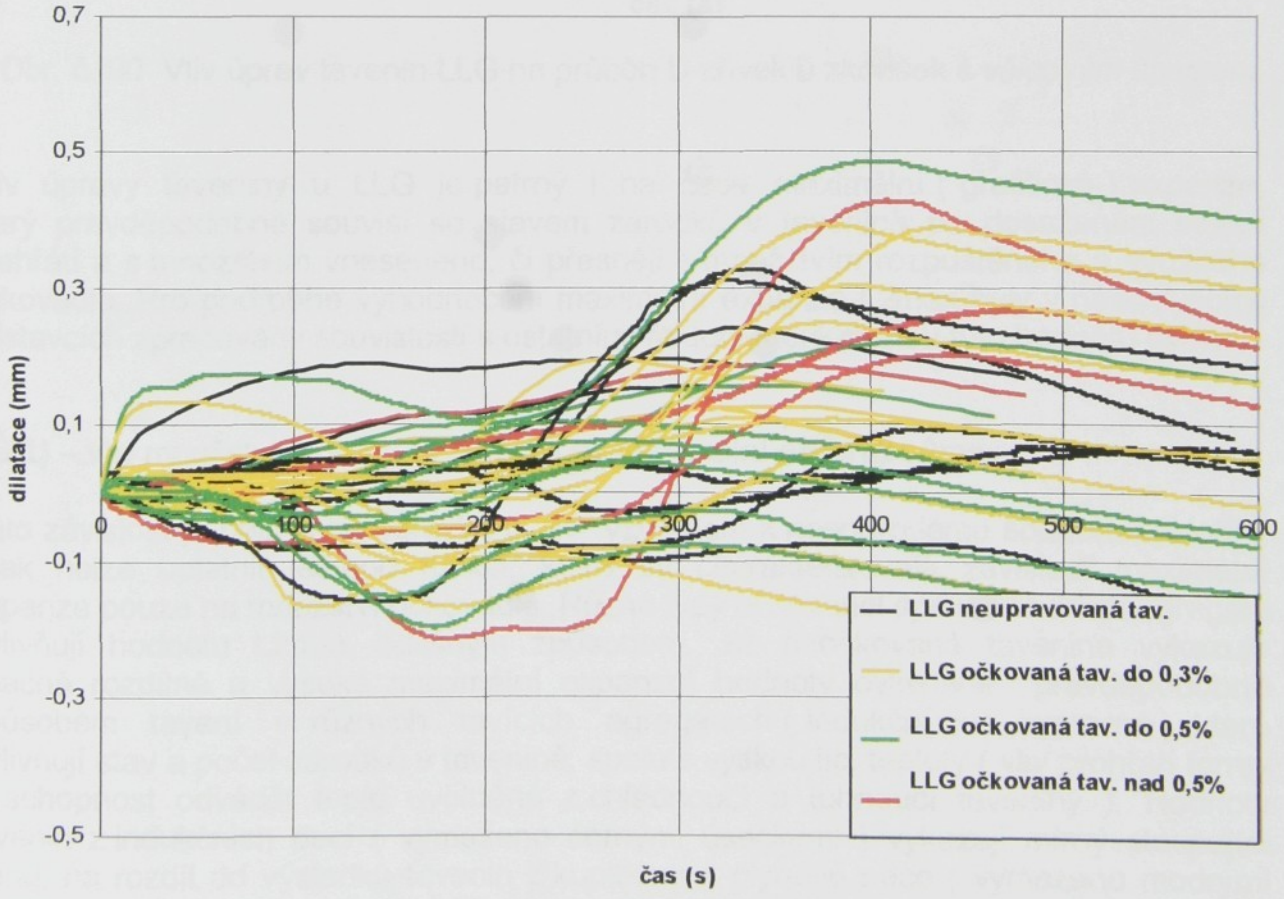
Obr. č. 88 Vliv množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce.

4.1.2 Rozbor výsledků D a T křivek ze zkoušek s *válcovým špalkem* (VŠ)

Zkouška s *válcovým špalkem* (*VŠ*) byla v časové posloupnosti druhá, na které se sledovaly průběhy D a T křivek různě upravených tavenin LLG, LČG a LKG. Pro studijní účely se odlévala do odlišných materiálů forem, především do formovací směsi s vodním sklem vytvrzované CO_2 (CT směs), jedná se o zkoušky číslo Š: 2, 4, 6, 8, 10 – 34, 36, 37, 49 – 84. Dále zkoušky s bentonitovou směsí (JBFS) číslo Š: 1, 3, 5, 7, 9, 35, 38, a nakonec i zkoušky s ocelovou formou (kokilou) předehřátou na 200 a 400 °C čísla Š:39 – 48. Celkem byly provedeny 84 laboratorní a provozní zkoušky, jejichž výsledky jsou zaneseny v tabulce č. 24 - A,B,C v příloze. Od zkoušky číslo 39 jsou výsledky rozšířeny o hodnocení struktury zkušebních odlitků. Při provozních zkouškách byl zjišťován i sklon taveniny k tvoření zákalky, jedná se o čísla zkoušek Š:10 – 34 a 63 – 78. Vzhledem k většímu souboru výsledků je jeho hodnocení rozdělené na zkoušky s LLG (kapitoly označené **AŠ**) a LČG, LKG (kapitoly označené **BŠ**) odlévané do CT forem a na samostatnou kapitolu zabývající se vlivem materiálu formy.

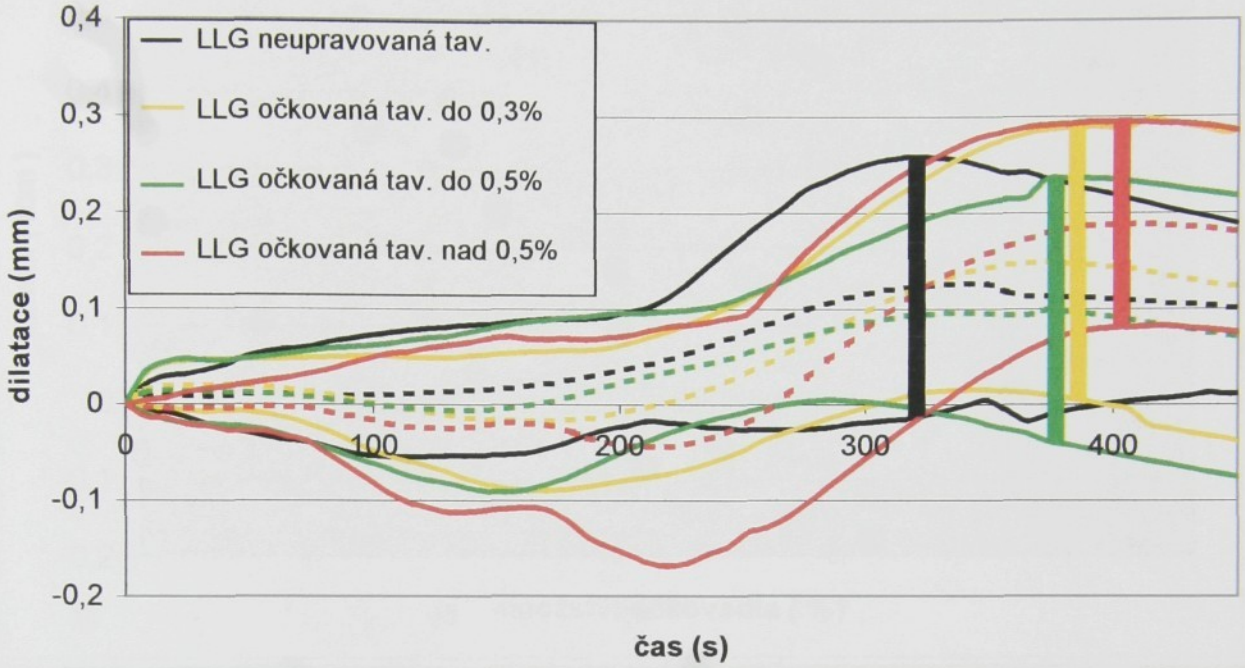
4.1.2.1 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek *VŠ* s LLG

Průběh získaných D křivek z posledních nejlépe zpracovaných zkoušek č. Š: 49 – 51, 54 – 72 a 79 - 84 je v souhrnu na obrázku č. 89. Jejich barevné rozlišení odpovídá množství dávkovaného očkovadla při úpravě LLG taveniny, jak je uvedeno v legendě. Již na tom to souhrnném obrázku je patrný rozdíl mezi skupinami a jednotlivými



Obr. č. 89 Průběhy D křivek LLG u posledních 28 zkoušek s *válcovým špalkem*.

zkouškami, který vynikne po úpravě, jak je vidět obrázku č. 90. Ten znázorňuje čárkovaně průměrné hodnoty a plně směrodatné odchylky daného souboru zkoušek se zvýrazněním oblasti (grafitické) expanze L2max. Z obrázku je patrný vliv úpravy taveniny na průběh a maximum D křivek, který již není tak výrazný, jako u válcové tyče, ale obsahuje navíc první minimum, které grafitickou expanzi zřetelně ohraničuje. Pro orientaci na D křivkách viz detailně popsaný obrázek č. 63.



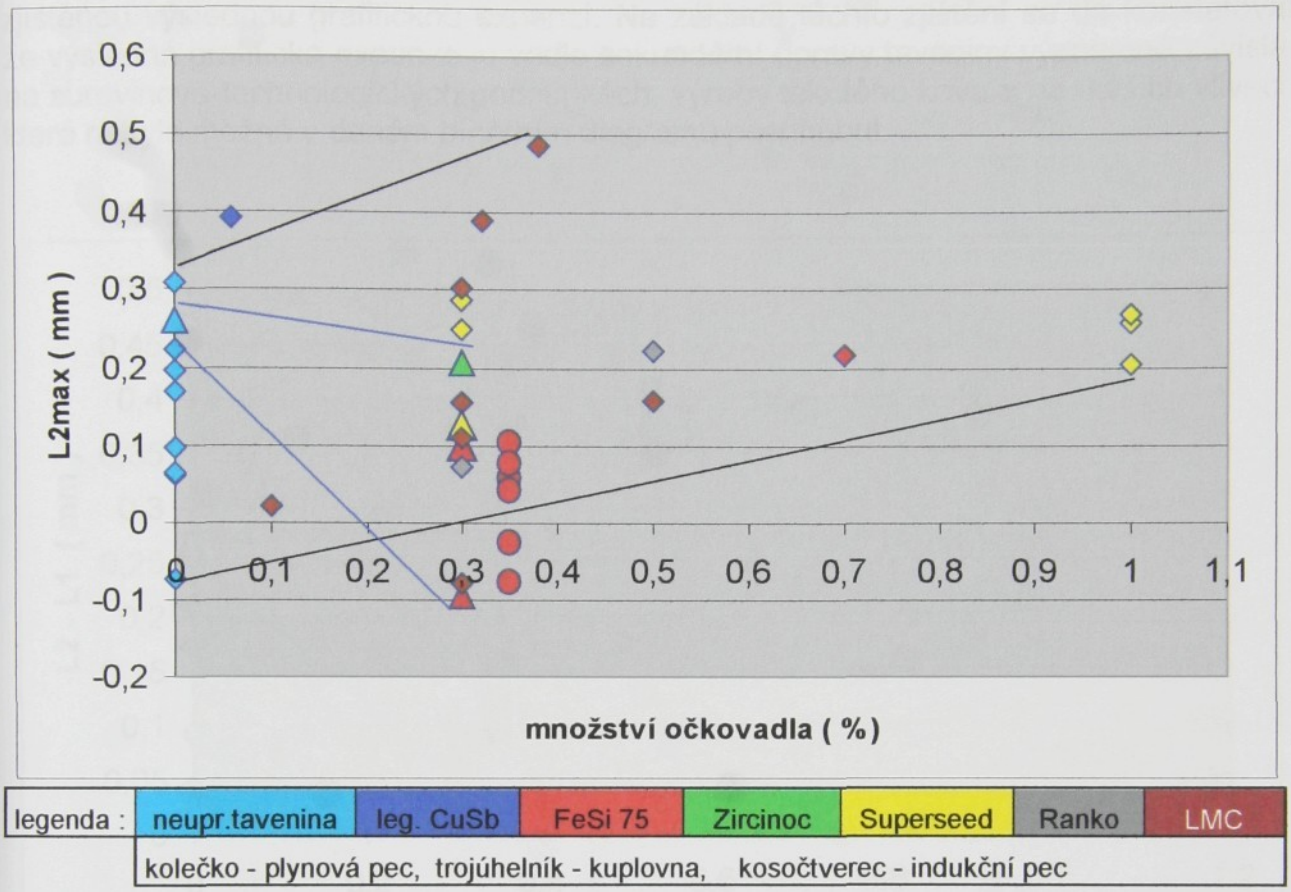
Obr. č. 90 Vliv úprav tavenin LLG na průběh D křivek u zkoušek s *válcovým špalkem*.

Vliv úpravy taveniny u LLG je patrný i na čase maximální (grafitické) expanze, který pravděpodobně souvisí se stavem zárodků v tavenině po dosaženém stupni přehřátí a s množstvím vneseného, či přesněji s množstvím rozpuštěného a využitého očkovadla. Pro podrobné vyhodnocení maximální expanze L2max byly v následujících odstavcích zpracovány souvislosti s ostatními faktory,které mohou tuto hodnotu ovlivnit.

AŠ 1) – vliv množství a druhu očkovadla na maximální expanzi L2max

Tato závislost je patrná na obrázku č. 91. Vzhledem k nesourodému souboru výsledků však nelze uplatnit jedinou funkci, která by charakterizovala závislost maximální expanze pouze na množství očkovadla. Různé typy očkovadel spolu s tavícími agregáty ovlivňují hodnotu L2max odlišným způsobem. Již neočkovaná tavenina vykazuje značně rozdílné a vysoké maximální expanzní hodnoty ovlivněné pravděpodobně způsobem tavení v různých tavících agregátech (Indukční pec, kuplovna), které ovlivňují stav a počet zárodků v tavenině, spolu s výškou licí teploty (vliv prohřátí formy a schopnost odvádět teplo uvolněné z chladnoucí a tuhnoucí taveniny). Hodnoty tavenin z indukčních pecí (vymezeno černými úsečkami) vykazují mírný stoupající trend, na rozdíl od výsledků tavenin z kuplovny a plynové pece (vymezeno modrými úsečkami), které vykazují trend mírně klesající a jejichž hodnoty se trvale pohybují na spodní hranici souboru hodnot maximálních dilatací L2max.

Z obrázku je patrný rozdíl mezi klasickými očkovadly typu: FeSi + Al,Ca ...a očkovadly s malým množstvím razantního dezoxidovadla typu: Sc, Zr, ...a to již v malých množstvích, nejvýrazněji do 0,5%. Výsledky s 1% budou pravděpodobně zatíženy i chybou nedokonalého rozpuštění celkového množství očkovadla.

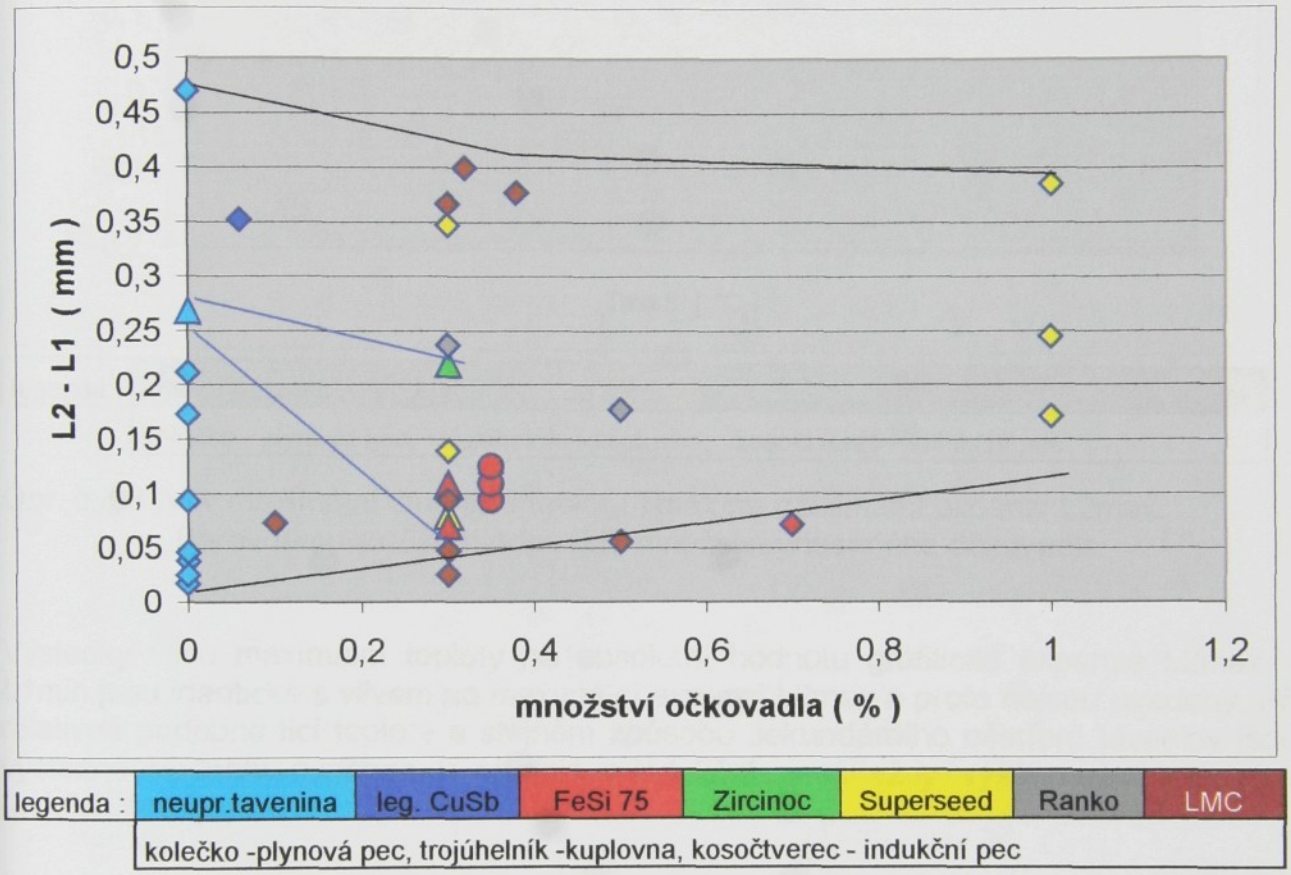


Obr. č. 91 Vliv sekundární úpravy taveniny (množství očkovadla %) na maximální expanzi L2max. Barevnému rozlišení odpovídá typu vneseného očkovadla.

Protože je hodnota L2max odečítána od počáteční nuly, je závislá na předcházejících dilatačním ději. Zahrnuje i první maximální dilataci L1max spolu s prvním minimem L1min, tedy dějem, který je reakcí na rozpínání a smršťování povrchových – kontaktních částí formy s taveninou a smršťování austenitu vzniklého pod teplotou likvidu. Proto může mít začátek expanze v bodě L1min zápornou hodnotu a v případě, že maximální grafitické rozpínání není výrazné a nepřekročí počáteční nulovou hodnotu, bude i výsledná hodnota L2max záporná. Hodnota L2max má tedy praktický význam při zhodnocení výsledných dilatací pro soustavu odlitek - forma během chladnutí a tuhnutí taveniny, při kterém vady vnitřní homogenity odlitků vznikají.

Ke zhodnocení vlivu množství a druhu očkovadla, vztahujícího se pouze na expanzi grafitu během eutektické reakce, byly tyto údaje posuzovány vzhledem k absolutním hodnotám maximální expanze grafitu: L2max - L1min, jak je vidět na obrázku č. 92. V této absolutní hodnotě by měl být alespoň částečně snížen vliv formy spolu s předcházejícím stavem taveniny, a proto je zde hledaná závislost o něco zřetelnější. Pro hodnoty tavenin z indukčních pecí (vymezeno černými přímkami) opět platí, že při větším množství očkovadla je absolutní hodnota expanze grafitu relativně vyšší. Hodnoty tavenin z kuplovny a plynové pece (vymezeno modrými přímkami) vykazují opět mírně klesající tendenci. Množství aplikovaného očkovadla nad 0,5 % je pravdě-

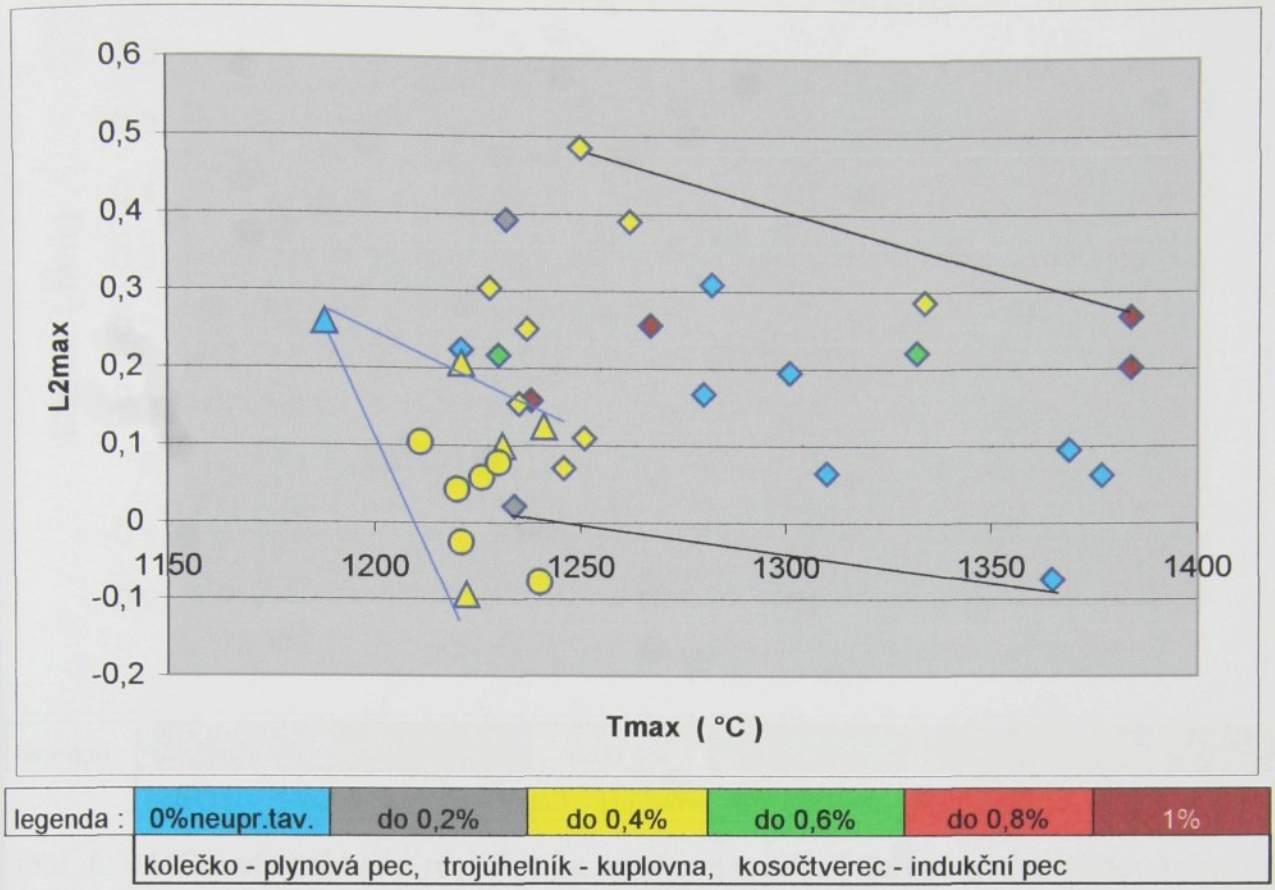
podobně zatíženo problémy spojenými s jeho rozpouštěním, či vyčerpáním dezoxidační reakce v dané tavenině. Pravděpodobně proto nevykazují zjištěné výsledné hodnoty u těchto vyšších množství očkovadel zásadní rozdíly od množství nižších. Celý soubor porovnávaných výsledků je při stejném množství či při stejném druhu očkovadla různorodý a nevytváří jednoznačnou závislost mezi sekundární úpravou taveniny a zjištěnou výslednou grafitickou expanzí. Na základě těchto zjištění se dá konstatovat, že výsledná grafitická expanze je vedle sekundární úpravy taveniny významně závislá i na surovinově-technologických podmínkách výroby tekutého kovu a na dalších vlivech, které nebylo možné v daném binárním diagramu postihnout.



Obr. č. 92 Vliv sekundární úpravy taveniny (množství očkovadla %) na absolutní hodnotu maximální expanze grafitu L2max - L1min. Barevnému rozlišení odpovídá typ vneseného očkovadla.

AŠ 2) – vliv licí teploty na maximální expanzi L2max

Na obrázku č. 93 je zobrazen vliv maximální naměřené teploty taveniny Tmax na hodnotu L2max spolu s barevným rozlišením jednotlivých zkoušek vzhledem k množství vneseného očkovadla a tavícího agregátu. Ani zde nebylo možné použít jedinou a nejvhodnější matematickou funkci, která by charakterizovala hledaný vliv. Překvapující však bylo zjištění pozitivního vlivu vyšší licí teploty u jednotlivých tavících agregátů. Výsledky tavenin z kuplovny a plynové pece jsou mezi modrými úsečkami a výsledky z indukční pece mezi přímkami černými. Výraznější trend vykazují výsledky neočkovaných tavenin z indukční pece, oproti nevýraznému trendu tavenin očkovaných, které mají velký rozptyl zjištěných hodnot.

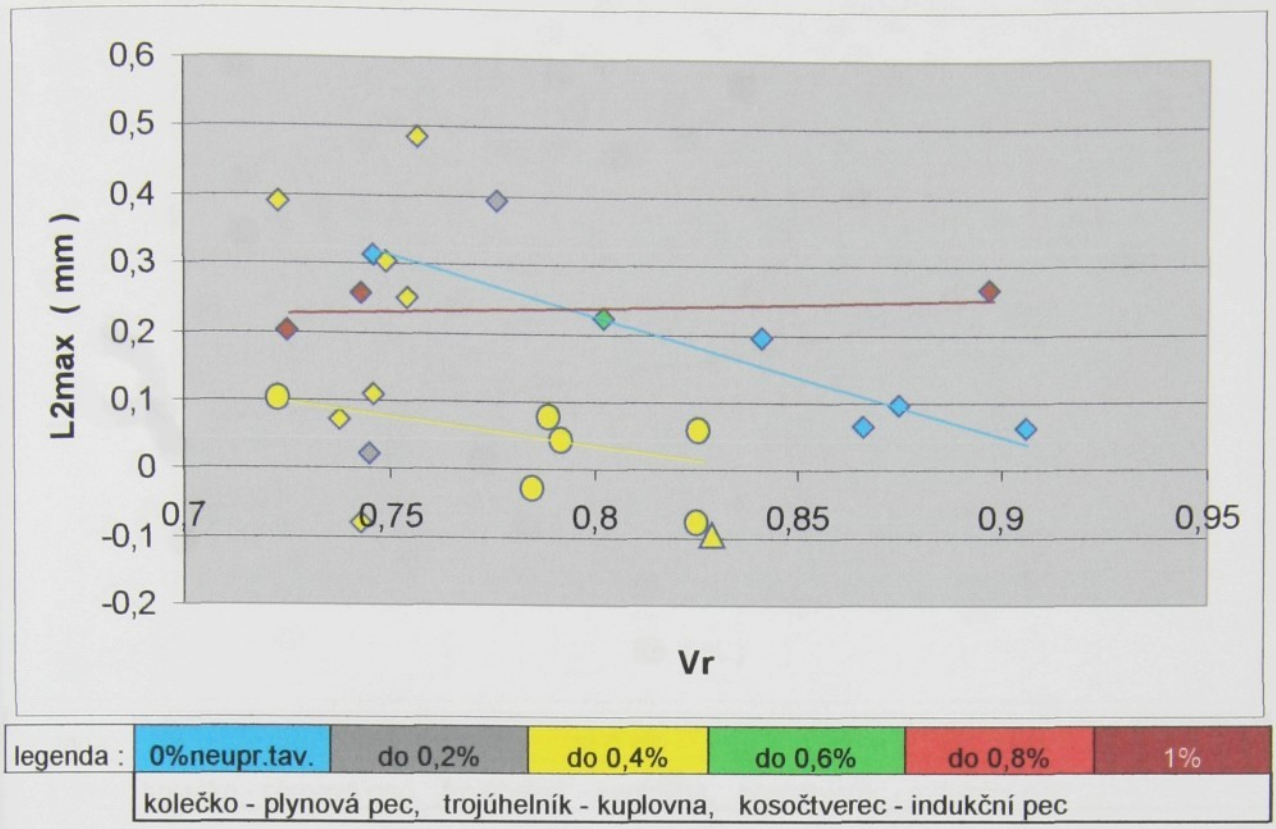


Obr. č. 93 Vliv maximální změřené teploty Tmax na maximální expanzi L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

Výsledky vlivu maximální teploty na absolutní hodnotu grafitické expanze L2max – L1min jsou identické s vlivem na maximální expanzi L2max a proto nejsou uvedeny. Při relativně podobné licí teplotě a stejném způsobu sekundárního ošetření taveniny jsou výsledné hodnoty expanze u tavenin z indukční pece vždy vyšší než z ostatních tavících agregátů.

AŠ 3) – souvislost tvaru, rozložení a velikosti grafitu s maximální expanzí L2max

Tak jako při vyhodnocení vlivu kvality grafitu u *válcové tyče*, tak i při vyhodnocení výsledků u *válcového špalku* byla použita hodnota relativní rychlosti zvuku Vr. Tento vztah je vidět na obrázku č. 94. Ani tentokrát nelze použít jedinou matematickou funkci k určení hledané spojitosti. Z obrázku je však jasně patrný trend snižování maximální expanze L2max při zjištěné vyšší relativní rychlosti zvuku Vr. Dobře čitelné jsou jednotlivé úrovně množství použitého očkovadla a zjištěný trend : bledě modré – neočkované litiny z indukční pece s očekávaným nepřímým trendem, žluté – litiny z plynové pece očkované od 0,2 do 0,4 % s nevýrazným nepřímým trendem a hnědé – taveniny z indukční pece očkované do 1% téměř s nulovým trendem. Výsledky tavenin z indukční pece očkovaných do 0,4% se nacházejí v malém rozpětí hodnot Vr při výrazných rozdílech expanzních hodnot L2max bez reálné možnosti odhadnout trend hledané spojitosti s kvalitou grafitu.



Obr. č. 94 Souvislost tvaru,rozložení a velikosti grafitu (nahrazeno veličinou relativní rychlosti zvuku Vr) na maximální expanzi L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

AŠ 4) – vliv chemického složení slitiny na maximální expanzi L2max

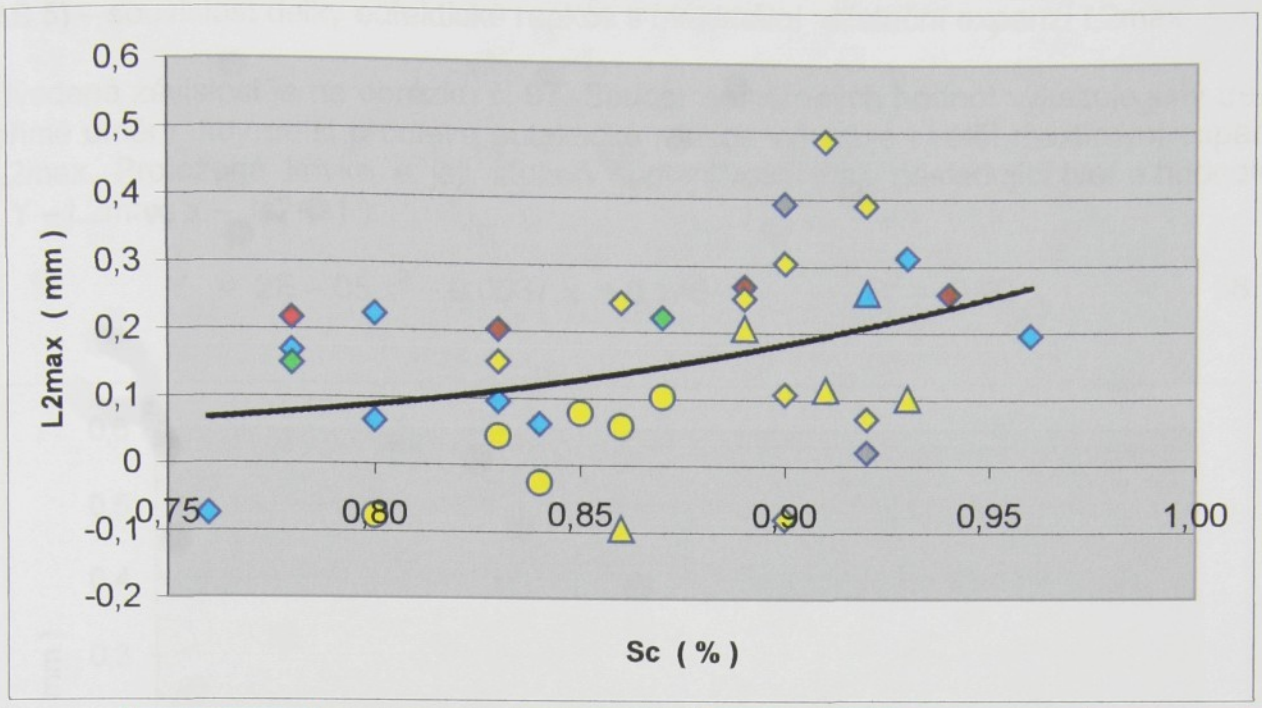
Chemické složení litin je zastoupeno souhrnným koeficientem Sc – stupněm eutektičnosti. Na obrázku č. 95 je patrný trend, kdy u vyšších hodnot Sc byly zjištěny vyšší hodnoty celkové maximální expanze L2max. Obrázek obsahuje i barevné rozlišení výsledných hodnot podle množství vneseného očkovadla, které však v hledaném vlivu nevytváří žádnou přímou závislost. Nejbližší vhodná matematická funkce spolu s uvedeným nízkým stupněm spolehlivosti mají následují tvar a hodnotu, (Y – L2max, x – Sc):

$$Y = 2{,}9933.x^2 - 4{,}1463.x + 1{,}4895 \qquad R^2 = 0{,}15 \qquad (56)$$

Pro zjištění přímého vlivu chemického složení na samotnou grafitickou expanzi při eutektické krystalizaci bylo složení posuzováno k hodnotě L2max – L1min. Na obrázku č. 96 je zřetelný rozdíl v rozptylu a ohraničení posuzovaných hodnot oproti obrázku č. 95. Tomuto zjištění odpovídá i proložená křivka s vyšším stupněm spolehlivosti, (Y - L2max – L1min, x – Sc) :

$$Y = 1{,}429.x^2 - 1{,}0078.x - 0{,}0338 \qquad R^2 = 0{,}36 \qquad (57)$$

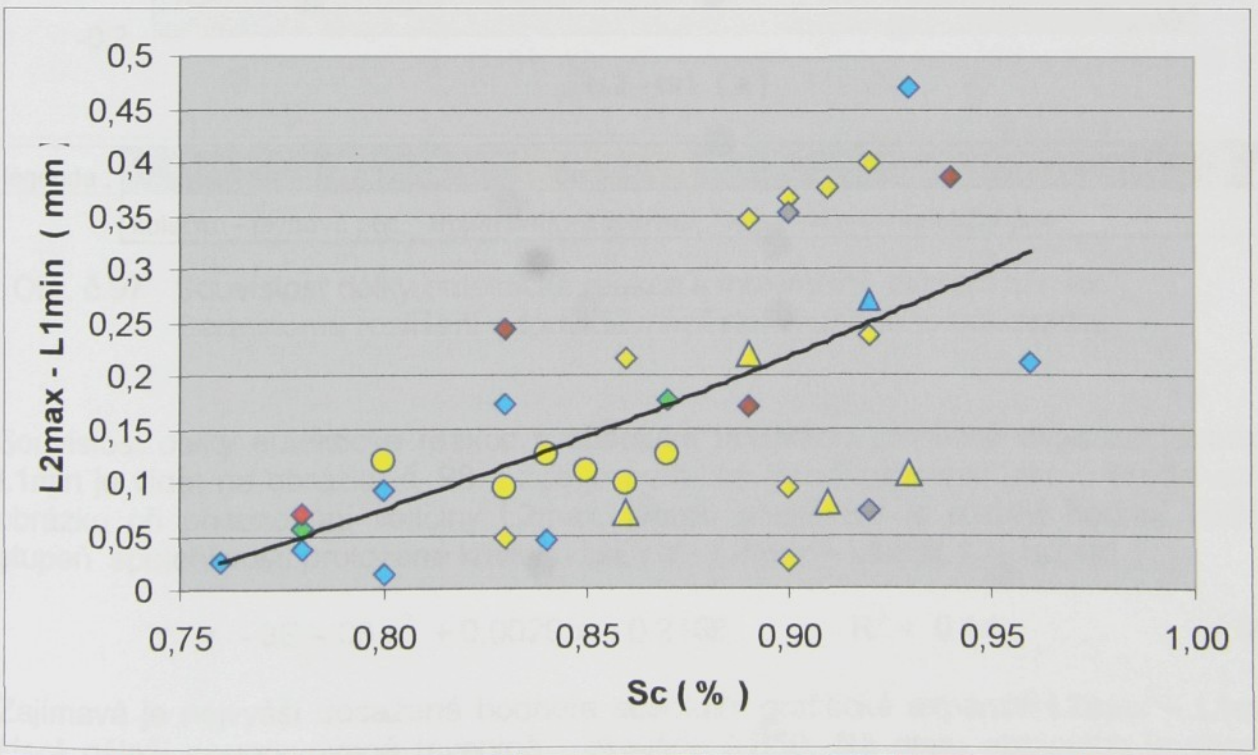
Zajímavé je horní ohraničení zjištěného rozptylu, které má lineární charakter a stoupající tendenci spolu s chemickým složením litin. Barevné rozlišení zjištěných výsledků podle množství vneseného očkovadla a tavícího agregátu neprokázalo jednoznačný přímý vliv chemického složení na expanzi grafitu.



legenda :	0%neupr.tav.	do 0,2%	do 0,4%	do 0,6%	do 0,8%	1%

kolečko - plynová pec, trojúhelník - kuplovna, kosočtverec - indukční pec

Obr. č. 95 Vliv chemického složení (nahrazeno souhrnnou hodnotou Sc) na maximální dilataci L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.



legenda :	0%neupr.tav.	do 0,2%	do 0,4%	do 0,6%	do 0,8%	1%

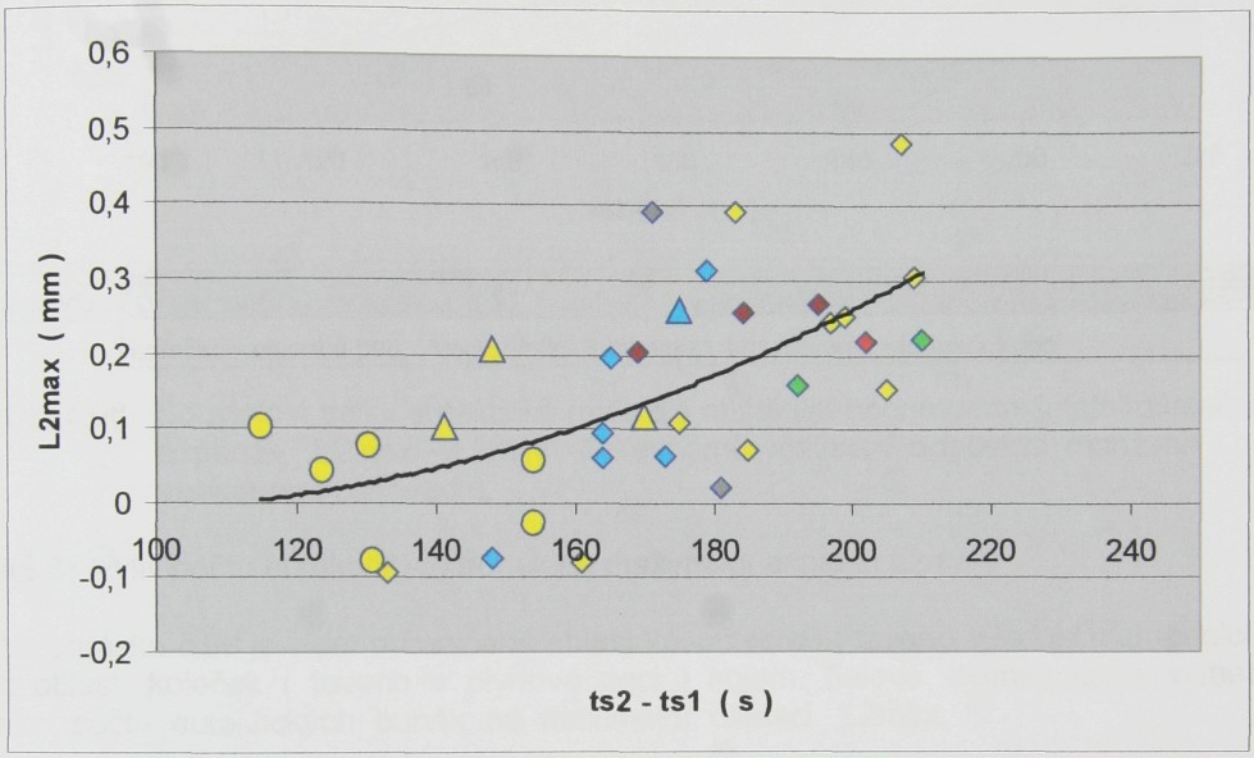
kolečko - plynová pec, trojúhelník - kuplovna, kosočtverec - indukční pec

Obr. č.96 Vliv chemického složení (nahrazeno souhrnnou hodnotou Sc) na absolutní hodnotu maximální grafitické expanze L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

AŠ 5) – souvislost délky eutektické reakce s maximální dilatační expanzí L2max.

Uvedená závislost je na obrázku č. 97. Soubor naměřených hodnot vykazuje jistý trend přímé úměry, kdy delší prodleva eutektické reakce vykazuje i větší maximální expanzi L2max. Proložená křivka a její stupeň spolehlivosti mají následující tvar a hodnotu, (Y – L2max, x – ts2-ts1):

$$Y = 2E-05.x^2 - 0{,}0037.x + 0{,}146 \qquad R^2 = 0{,}40 \qquad (58)$$



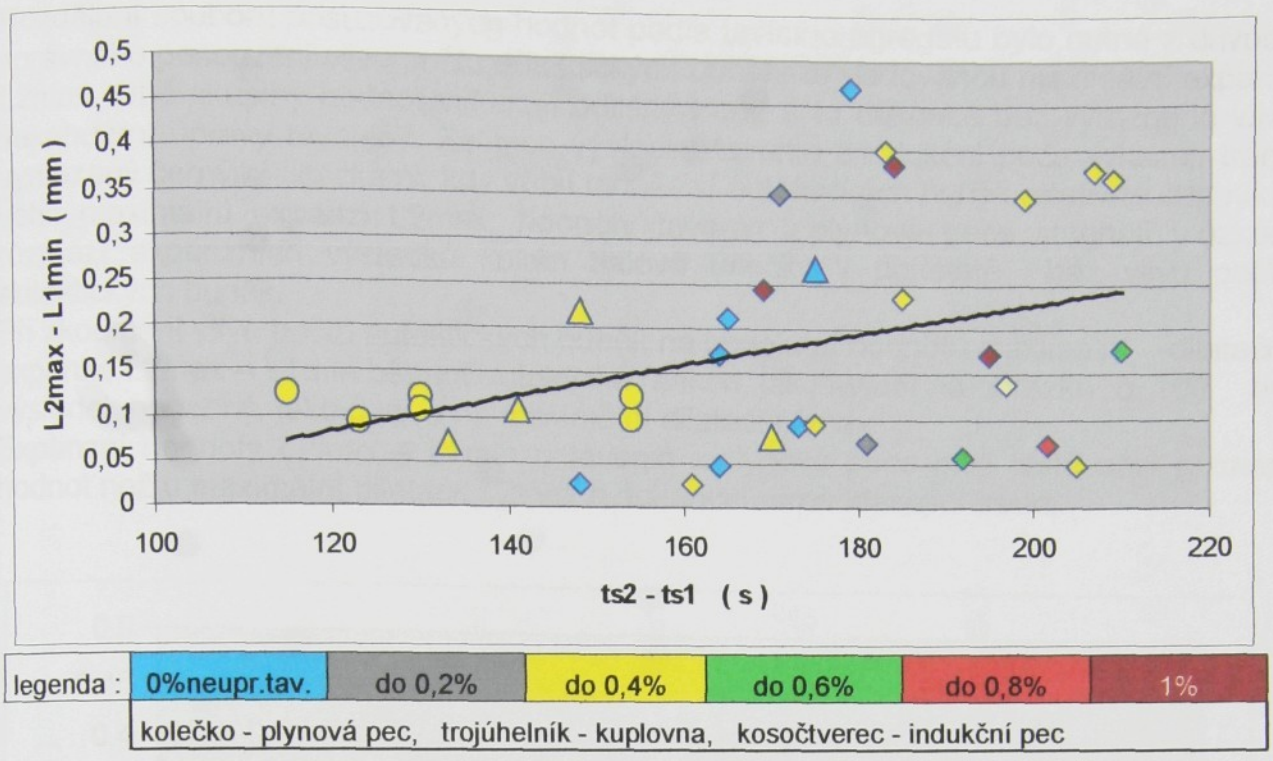
legenda :	0%neupr.tav.	do 0,2%	do 0,4%	do 0,6%	do 0,8%	1%
	kolečko - plynová pec, trojúhelník - kuplovna, kosočtverec - indukční pec					

Obr. č.97 Souvislost délky eutektické reakce s maximální dilatací L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

Souvislost délky eutektické reakce s absolutní hodnotou grafitické expanze L2max – L1min je vidět na obrázku č. 98. I zde je podobný trend závislosti jako u předchozího obrázku při posuzování veličiny L2max. Oproti očekávání je rozptyl hodnot větší a stupeň spolehlivosti proložené křivky nižší, (Y - L2max – L1min, x – ts2-ts1) :

$$Y = -3E-06.x^2 + 0{,}0029.x - 0{,}2159 \qquad R^2 = 0{,}14 \qquad (59)$$

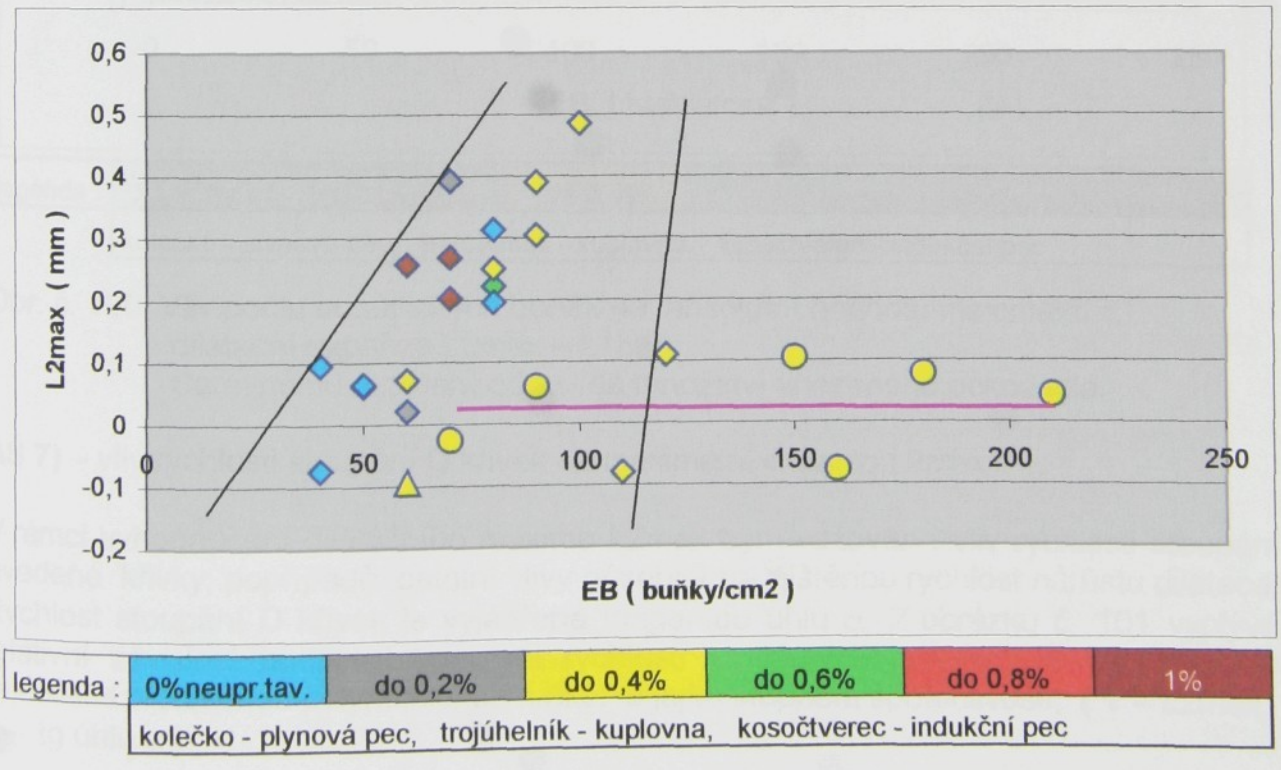
Zajímavá je nejvyšší dosažená hodnota absolutní grafitické expanze L2max – L1min, která náleží neupravované tavenině - zkoušce č.Š50. Na obou obrázcích je shodná téměř lineární závislost uvedených veličin u neupravovaných tavenin (bleděmodré kosočtverce). Z obou sledovaných závislostí vyplývá, že úprava taveniny na expanzi grafitu během eutektické krystalizace je pouze jeden z řady vlivů charakterizující stav taveniny. Nezanedbatelný vliv má i tavící agregát, průběh tavby, přehřátí taveniny, skladba vsázky, licí teplota atd.



Obr.č.98 Souvislost délky eutektické reakce s absolutní hodnotu maximální dilatační expanze L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

AŠ 6) – vliv počtu eutektických buněk na maximální expanzi L2max

Na obrázku č.99 je vidět ohraničená oblast kosočtverců (taveno v indukčních pecích) a oblast koleček (taveno v plynové peci) kolem fialové přímky, které vymezují vliv počtu eutektických buněk na maximální dilataci L2max.

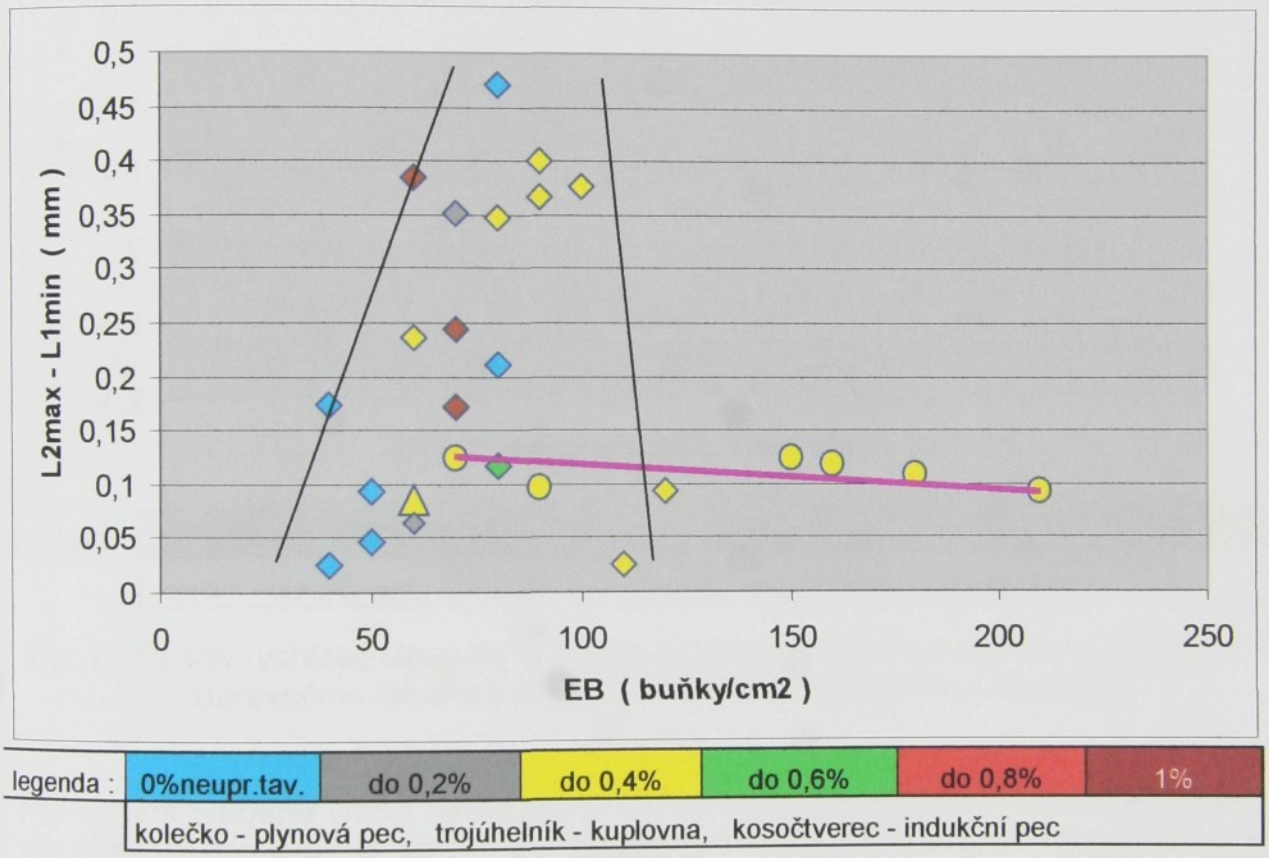


Obr. č. 99 Vliv počtu eutektických buněk na maximální dilataci L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

Rozdělení souboru posuzovaných hodnot podle tavícího agregátu bylo nutné z důvodu správného posouzení vlivu počtu eutektických buněk na sledovanou maximální expanzi L2max. Obě skupiny hodnot vykazují odlišný trend a to dokonce bez výrazného vlivu sekundární úpravy taveniny. Zatímco výsledky tavenin z indukční pece vykazují trend vymezený černými úsečkami, kdy větší množství eutektických buněk relativně odpovídá větší maximální expanzi L2max, hodnoty tavenin z plynové pece stagnují v úzkém rozmezí expanzních výsledků kolem fialové úsečky v podstatě bez vlivu počtu eutektických buněk.

Při zkoumání vlivu počtu eutektických buněk na absolutní hodnotu maximální dilatační expanze L2max – L1min během eutektické reakce, jak je vidět na obrázku č. 100 , byl výsledek podobný, jako u vlivu na maximální dilataci L2max.

Expanzní hodnoty L2max – L1min u tavenin z plynové pece mají ještě užší rozmezí hodnot než u maximální dilatace L2max a dokonce mírně klesající trend.



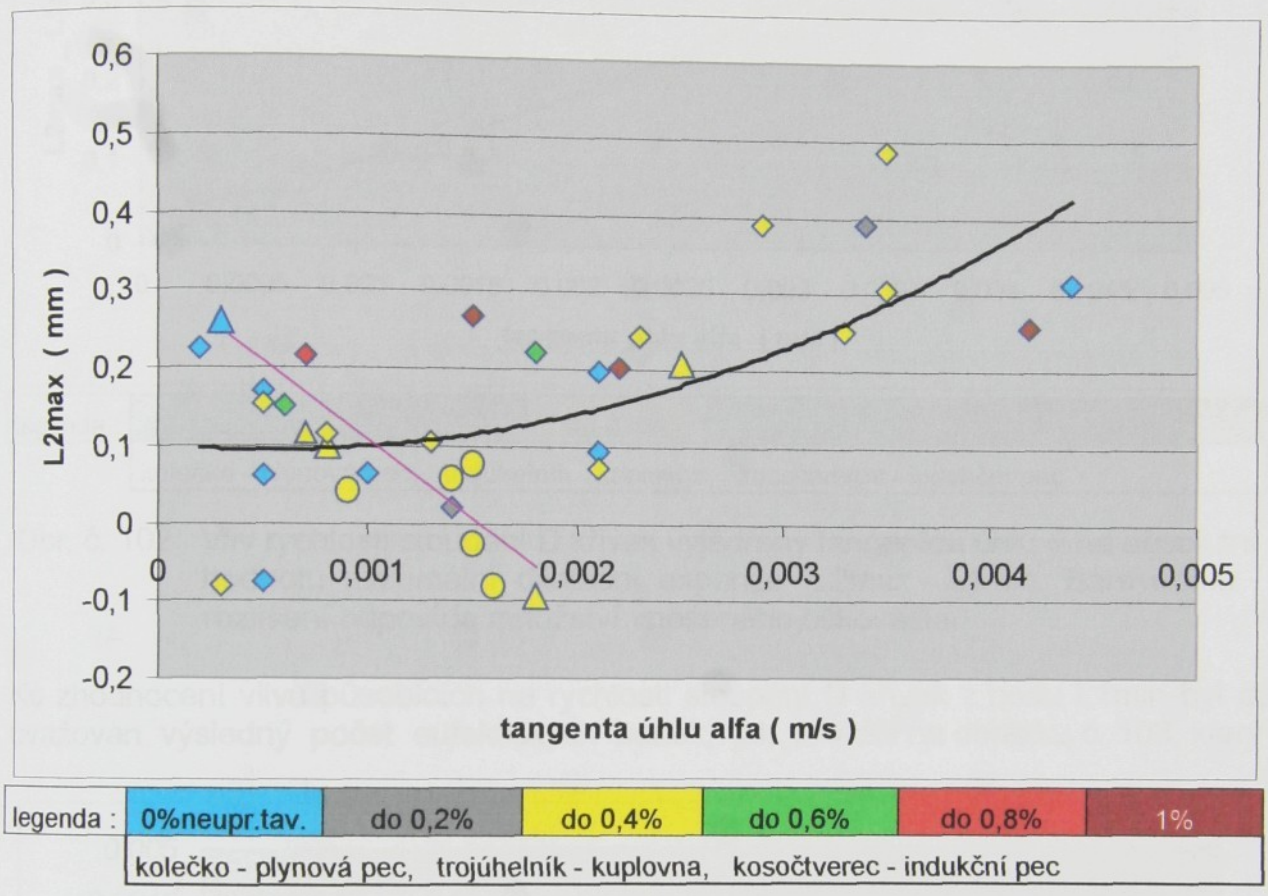
Obr. č. 100 Vliv počtu eutektických buněk na absolutní hodnotu maximální dilatační expanze L2max – L1min.
Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

AŠ 7) – vliv rychlosti stoupání D křivek na maximální expanzi L2max

V rámci vyhodnocení dilatačního maxima L2max byl uvažován i vliv rychlosti stoupání uvedené křivky, popřípadě ostatní vlivy působící na zjištěnou rychlost nárůstu dilatace. Rychlost stoupání D křivek je vyjádřena tangentou úhlu α. Z obrázku č. 101 vyplývá relativní závislost hodnot L2max na rychlosti stoupání dilatačních křivek, která je vyjádřena proloženou polynomickou funkcí a jejím stupněm spolehlivosti, (Y – L2max, x – tg úhlu α):

$$Y = 21736.x^2 - 22,196.x + 0,0997 \qquad R^2 = 0,37 \qquad (60)$$

Při podrobném zkoumání nelze přehlédnout opačný trend závislosti u tavenin z kuplovny a plynové pece, jejichž hodnoty se nacházejí okolo fialové úsečky. Tento opačný trend si lze vysvětlit pouze ději předcházejícími eutektickému tuhnutí, tj. dilatací formy a vznikem austenitu, protože jsou v hodnotě L2max obsažené. Při posuzování vlivu na samotnou grafitickou expanzi L2max – L1min nebyla tato odchylka (až na výjimku neupravované taveniny z kuplovny) potvrzena.

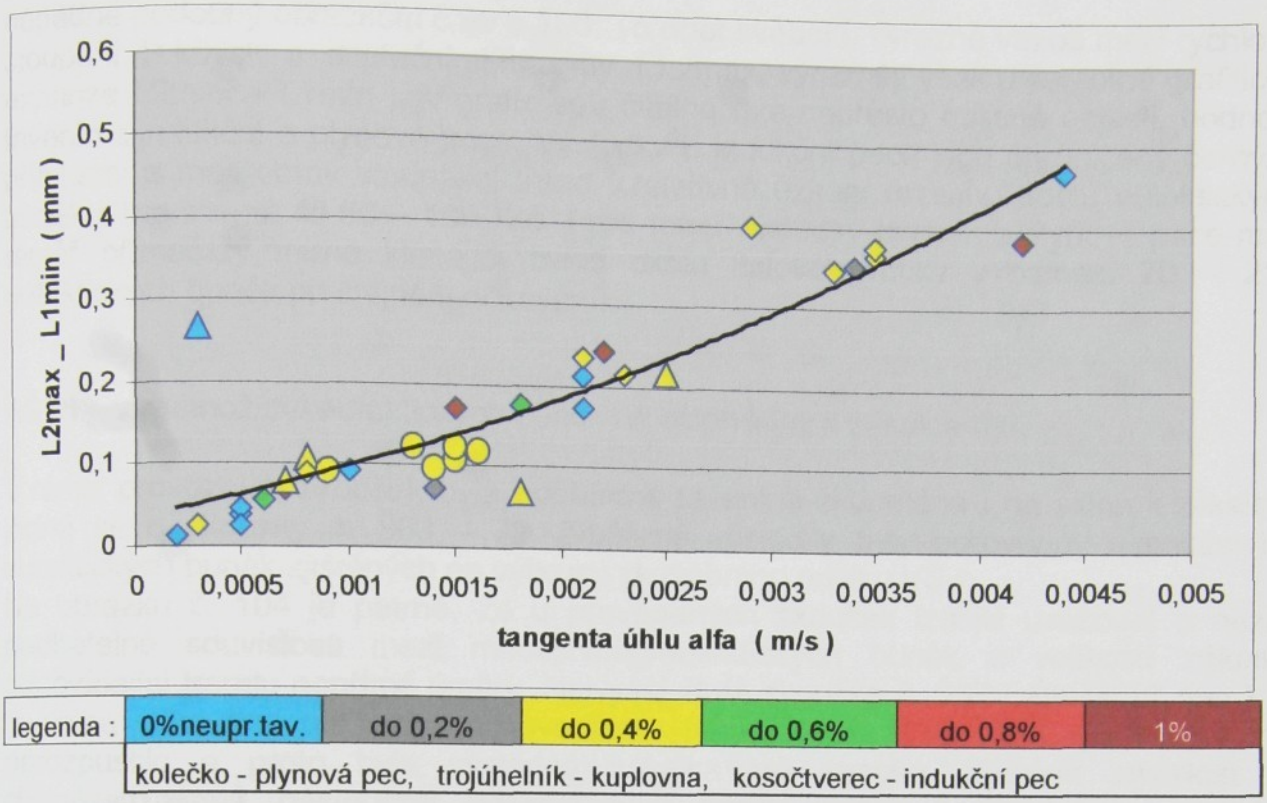


Obr. č.101 Vliv rychlosti stoupání D křivek vyjádřený tangentou úhlu α na L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

Pro zjištění průběhu vlastní grafitické expanze během eutektické reakce byl posouzen vliv rychlosti stoupání D křivek na absolutní hodnotu maximální dilatační expanze L2max – L1min, viz obrázek č. 102. Až na výjimky se jedná o výraznou závislost, která je charakterizovaná následnou polynomickou funkcí spolu s výrazným stupněm spolehlivosti, (Y – L2max – L1min, x – tg úhlu α) :

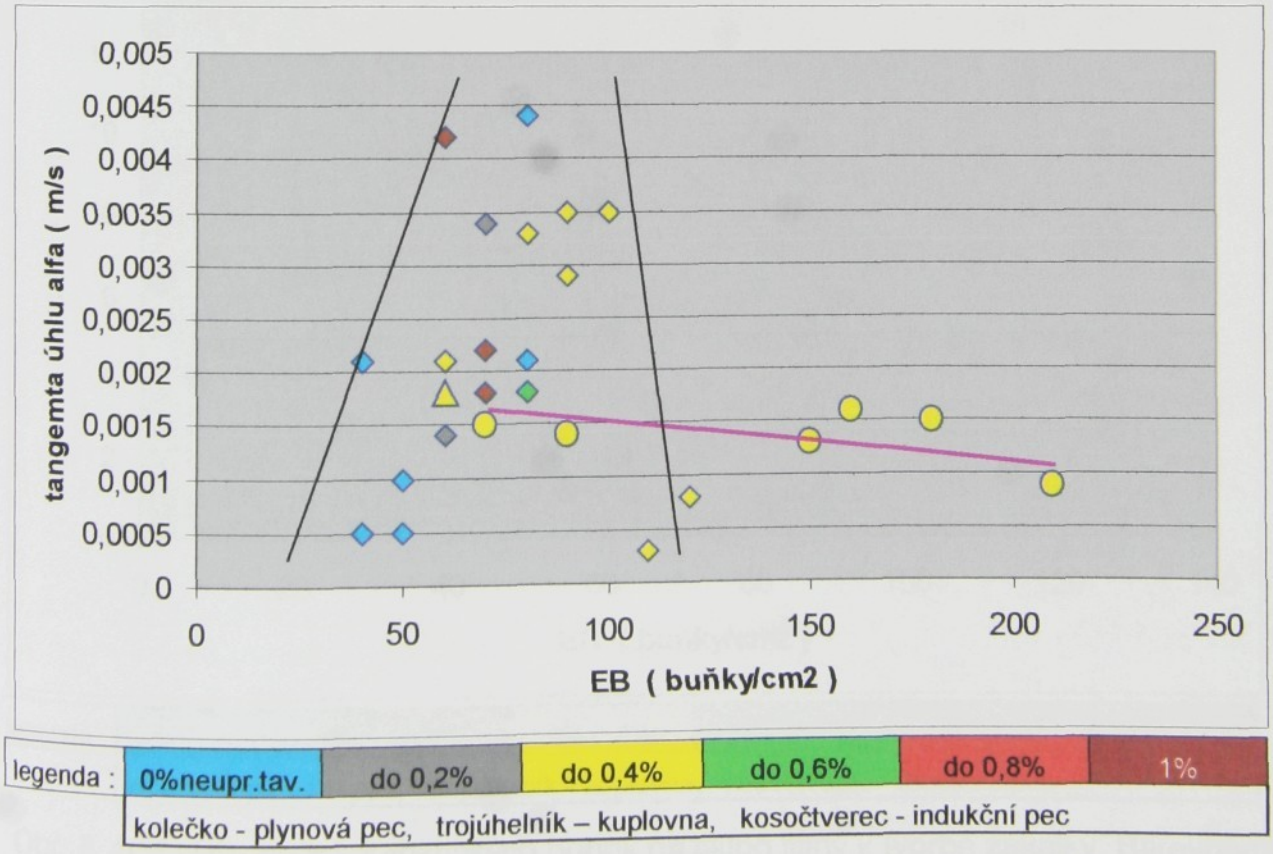
$$Y = 10971.x^2 + 52{,}959.x + 0{,}0356 \qquad R^2 = 0{,}83 \qquad (61)$$

Z nalezené závislosti vyplývá, že dosažení maximální hodnoty grafitické expanze je předurčeno především stavem tuhnoucí taveniny (zárodky: typ, množství ...?) již při jejím počátku v bodě L1min. Určitým zklamáním je nepotvrzení očekávaného vlivu množství očkovadla na rychlost stoupání D křivek. Barevné rozlišení, které je popsané v legendě, sice naznačuje určité trendy, ale vzhledem k překrývání jednotlivých barev se nedá formulovat jednoznačný závěr. Z obou obrázků lze vyčíst, že u neočkovaných tavenin převažuje nízká rychlost stoupání D křivek a s postupným navyšováním množství očkovadla rychlost vzrůstá.



Obr. č. 102 Vliv rychlosti stoupání D křivek vyjádřený tangentou úhlu α na absolutní hodnotu maximální dilatační expanze L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

Ke zhodnocení vlivů působících na rychlosti stoupání D křivek z bodu L1min byl dále uvažován výsledný počet eutektických buněk, jak je vidět na obrázku č. 103, který je



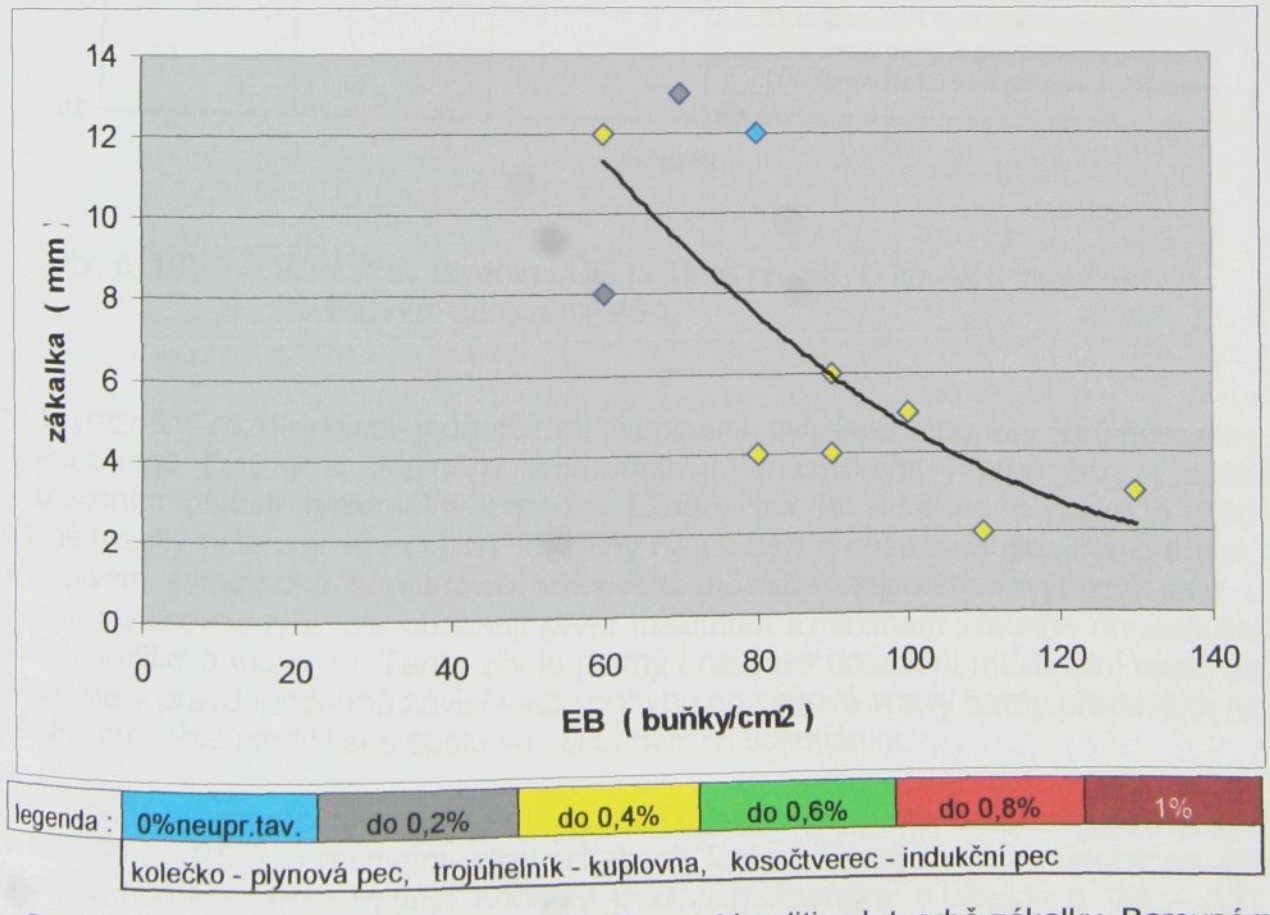
Obr. č. 103 Vliv počtu eutektických buněk na úhel stoupání α D křivek. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

nápadně podobný obrázkům č.99 a 100. To opět svědčí o výrazné vazbě mezi rychlostí stoupání D křivek a dilatačními maximy (L2max, výrazněji však u samotné grafitické expanze L2max – L1min). V grafu jsou čitelné dvě naprosto odlišné oblasti, hodnoty tavenin z indukční a plynové pece. Výsledky u indukční pece jsou ohraničeny černými přímkami a mají strmý stoupající trend v relativně úzkém rozsahu počtu eutektických buněk s hranicemi: 40,50 – 100,120. Proti tomu výsledky tavenin z plynové pece mají téměř přímočarý mírně klesající trend okolo fialové přímky v rozmezí 70 – 210 eutektických buněk při stejném očkování!

AŠ 8) – vliv množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce

V rámci provozních zkoušek byla odebíraná tavenina zkoumána i na sklon k zákalce, jedná se o zkoušky č. Š63 – 72. Změřené výsledky byly porovnány s množstvím eutektických buněk zjištěných na výbrusu zkušebního odlitku VŠ.
Na obrázku č. 104 je patrné, že u provedených zkoušek lze již uvažovat o neza-nedbatelné souvislosti mezi množstvím eutektických buněk a velikostí zákalky odpovídající trendu nepřímé úměry. Nejvyšší žlutá zkouška č. Š67 (klínek 12 mm) je tavenina očkována uhlíkatým očkovadlem RANKO, které se pravděpodobně plně nerozpustilo a proto byla výsledná zákalka tak vysoká. Zjištěná závislost je charakterizovaná následnou polynomickou funkcí spolu s uvedeným stupněm spolehlivosti, (Y – zákalka, x – eutektické buňky) :

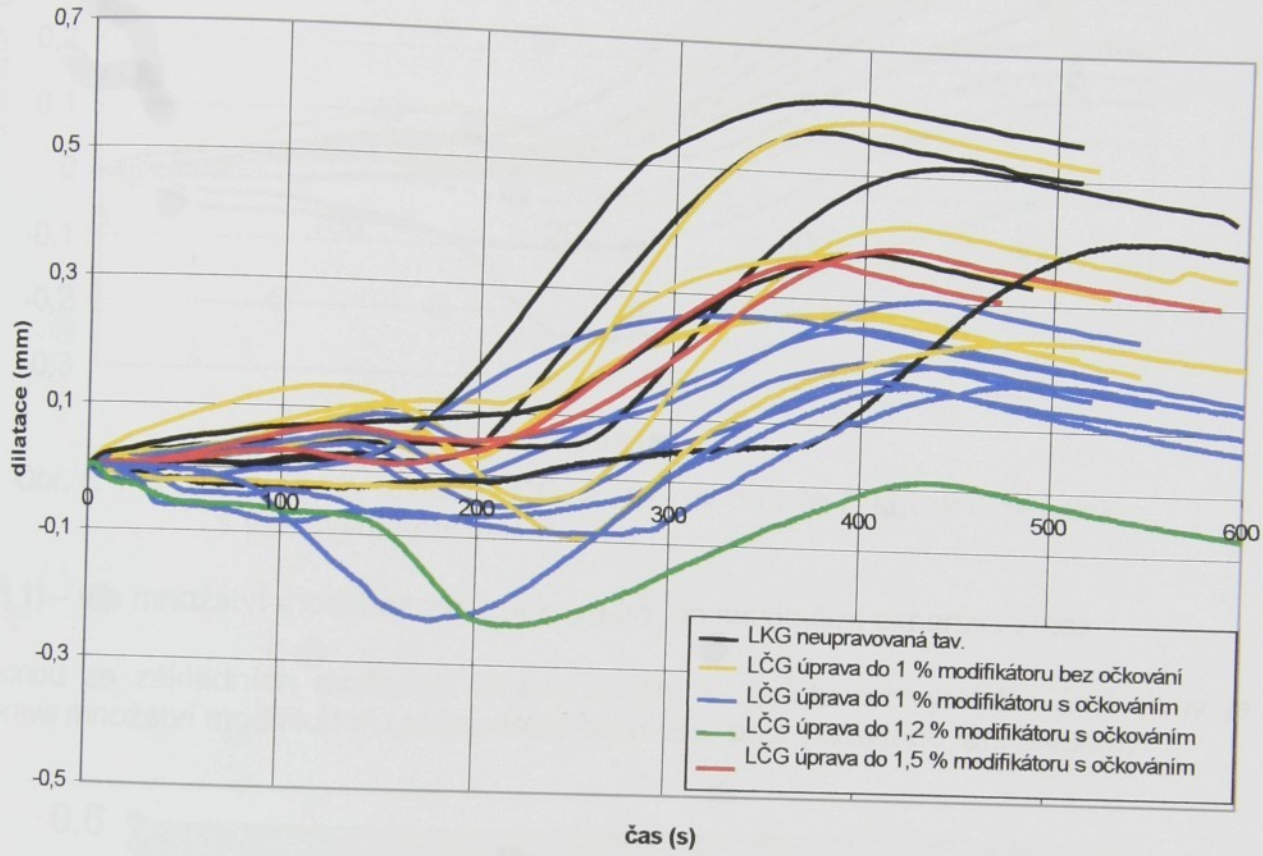
$$Y = 0{,}0012.x^2 - 0{,}3634.x + 28{,}706 \qquad R^2 = 0{,}57 \qquad (62)$$



Obr. č. 104 Vliv počtu eutektických buněk na sklon litiny k tvorbě zákalky. Barevnému rozlišení odpovídá množství vneseného očkovadla.

4.1.2.2 Rozbor vlivů na charakter a průběh D křivek u zkoušek VŠ s LČG,LKG

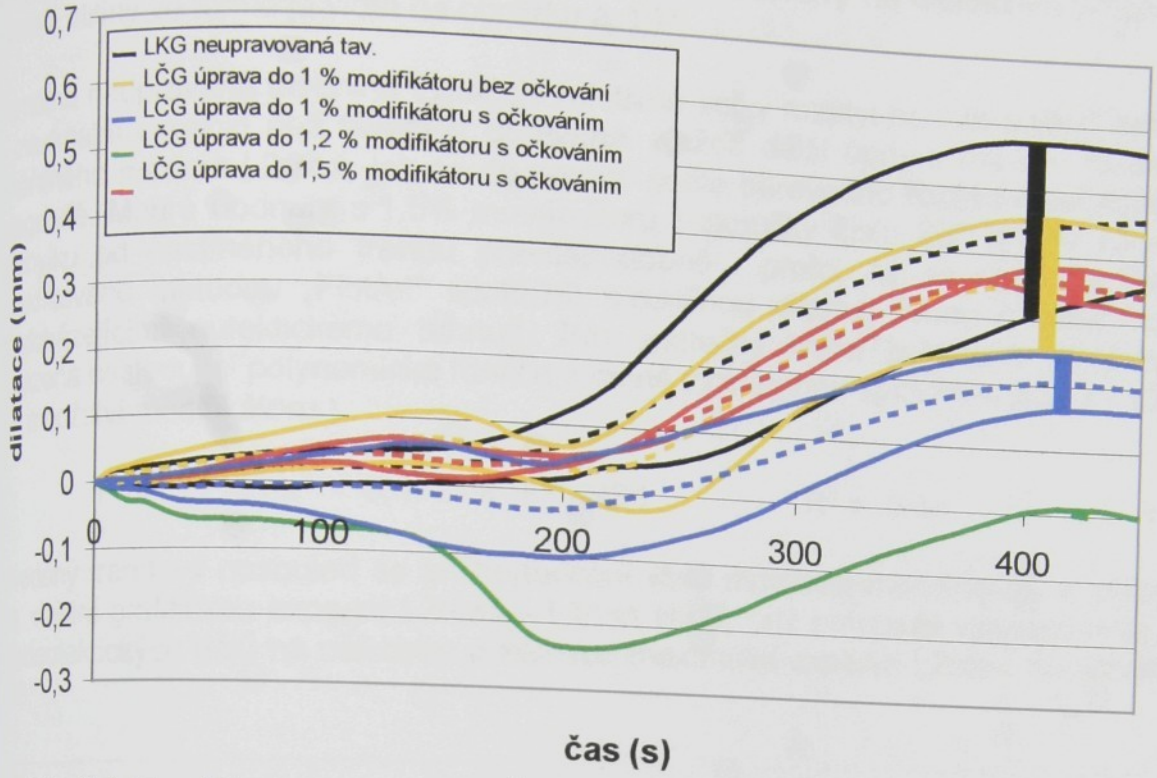
Průběh získaných D křivek ze zkoušek, odlévaných do CT forem, číslo Š10 – 23, 32,34,37, 73 – 78, je v souhrnu na obrázku č. 105. Jejich barevné rozlišení odpovídá množství použitého modifikátoru a očkovadla, viz legenda. Také na tomto souhrnném obrázku je patrný rozdíl mezi jednotlivými skupinami zkoušek.



Obr. č. 105 Vliv úprav tavenin LČG,LKG na průběh D křivek u zkoušek s *válcovým špalkem* (VŠ).

Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými skupinami byly jejich hodnoty zprůměrovány (přerušované čáry) a doplněny směrodatnými odchylkami (plné čáry) spolu s vyznačením oblasti maximální expanze L2max, jak je vidět na obrázku č. 106. Zjištěné rozdíly potvrzují vliv úpravy taveniny na průběh a dosažená maxima D křivek, která vlivem symetrické konstrukce *válcového špalku* nejsou tak výrazná jako u zkoušek s *válcovou tyčí*, ale obsahují první maximum s minimem zřetelně ohraničující začátek grafitické expanze. Tento vliv je patrný i na čase dosažení maximální expanze L2max, který pravděpodobně závisí vedle pohybu povrchové vrstvy formy především na výsledku proběhlé modifikace spolu se sekundárním očkováním.

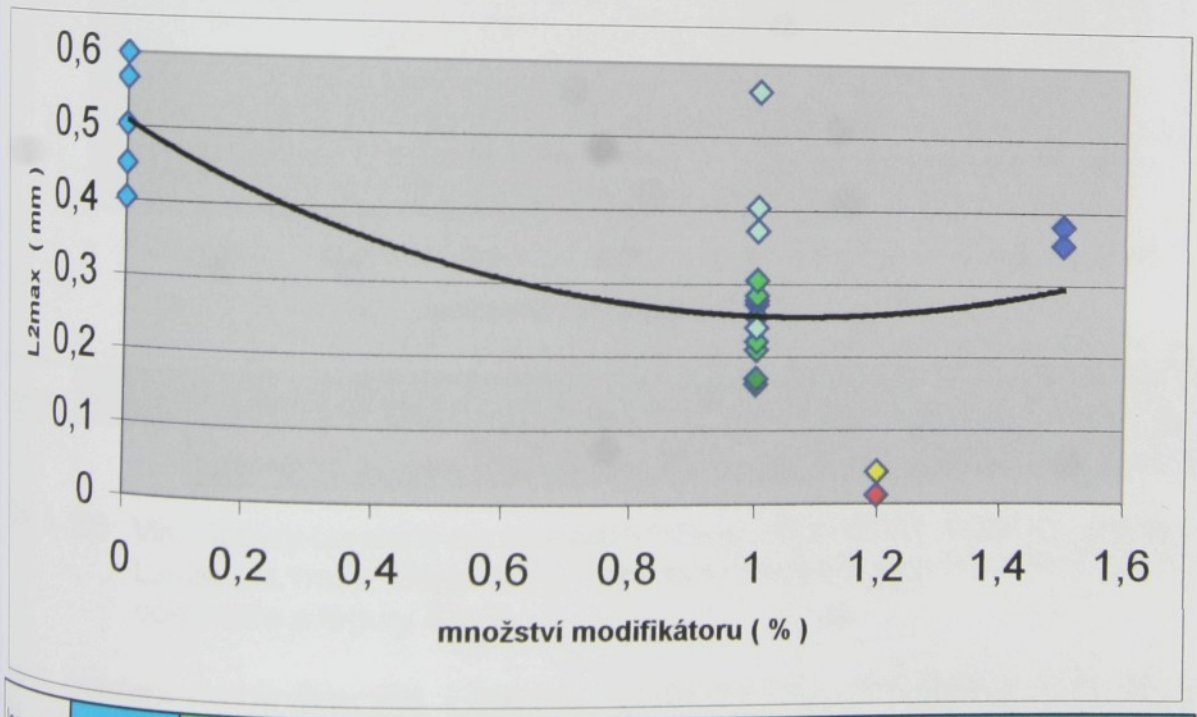
Pro podrobné vyhodnocení maximální expanze L2max byly v následujících odstavcích (s označením BŠ) zpracovány vlivy ostatních faktorů, které mohou působit na její výslednou hodnotu. Posuzované hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č. 24 – A,C v příloze.



Obr. č. 111 Vliv úprav tavenin LČG a LKG na průběh D křivek u zkoušek s *válcovým špalkem* .

BŠ 1) – vliv množství modifikátoru a očkovadla na maximální expanzi L2max

Jednou ze základních možností změny kvality materiálu při výrobě tvárné litiny je úprava množství modifikátoru,sekundární očkování, popřípadě legování taveniny.



Obr. č. 107 Vliv úpravy taveniny na maximální expanzi L2max. Barevné rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

Jakým způsobem se projevují jednotlivé či souhrnné úpravy na dilatačním procesu při tuhnutí slitiny ve formě je vidět na obrázku č. 107.

Samotná neupravená tavenina vykazuje relativně velký rozptyl hodnot a větší celkovou - maximální expanzi než taveniny upravené. Každá další úprava má vliv na snížení změřeného maxima L2max, jak se dá poznat podle barevného rozlišení definovaného v legendě. Modré hodnoty s 1,5% modifikátoru (zkoušky číslo Š32 a Š34) vykazují odchylku od nastíněného trendu pravděpodobně i proto, že se jedná o zkoušky modifikované metodou „Flotret" společně s odlišnou dilatací formy a ostatními ději předcházejícími eutektickému tuhnutí. Pro společný trend byla jako nejvhodnější nalezena následující polynomická funkce s méně významnou spolehlivostí, (Y - L2max, x - množství modifikátoru) :

$$Y = 0{,}2191.x^2 - 0{,}4711.x + 0{,}4436 \qquad R^2 = 0{,}44 \qquad (63)$$

Uvedený trendový nesoulad se při hodnocení vlivu množství modifikátoru a očkovadla na vlastní grafitickou expanzi L2max – L1min snížil, což potvrzuje význam ostatních - předeutektických dějů na celkovou a zároveň maximální expanzi L2max, viz obrázek č. 108.

Obr. č. 108 Vliv úpravy taveniny na absolutní hodnotu maximální grafitické expanze L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

Vlivem omezení porovnávaných výsledků, především na eutektickou část tuhnutí, má vybraná nejvhodnější polynomická funkce stupeň spolehlivosti o něco málo větší, (Y - L2max-L1min, x – množství modifikátoru) :

$$Y = 0{,}1504.x^2 - 0{,}3541.x + 0{,}5085 \qquad R^2 = 0{,}51 \qquad (64)$$

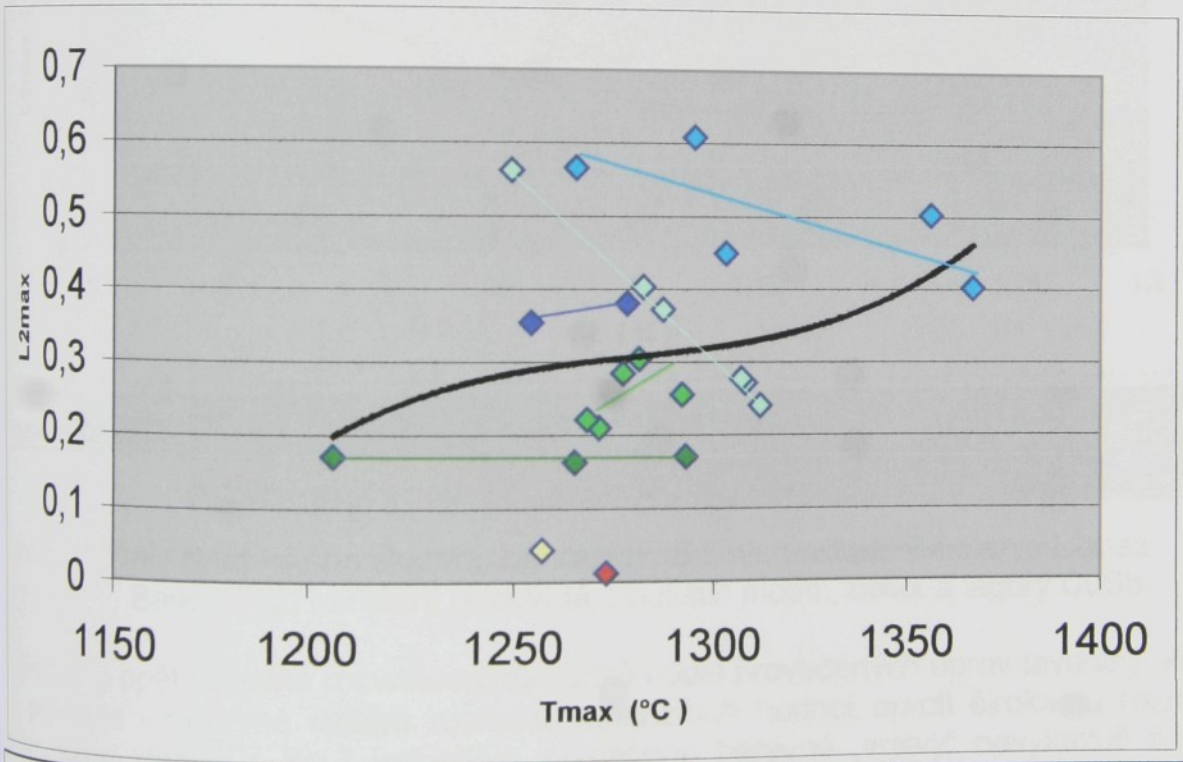
Ze zjištěné závislosti vyplývá nepřímá vazba expanzních dějů na jednotlivé úpravy taveniny, které se v praxi používají především k docílení mechanických vlastností odlitků.

BŠ 2) – vliv odlévací teploty na maximální expanzi L2max

Výsledek celkového trendu vlivu všech uvažovaných hodnot maximální naměřené teploty na maximální expanzi L2max na obrázku č. 109 je polynomická funkce se zanedbatelným stupněm spolehlivosti, (Y – L2max, x – odlévací teplota) :

$$Y = 2E - 0,7.x^3 - 0,0006.x^2 - 0,7776.x - 332,09 \qquad R^2 = 0,1 \qquad (65)$$

Při barevném rozlišení a vzájemném propojení jednotlivých hodnot podle provedené úpravy taveniny, jak je uvedeno v legendě, vznikly zajímavé trendy s rozdílnými směrnicemi proložených úseček. Výsledky neupravovaných a pouze s 1% modifikovaných tavenin vykazují podobný výrazně nepřímý trend na rozdíl od tavenin s vyšším obsahem modifikátoru spolu se sekundárním očkováním a legováním, které jsou na sledované teplotě nezávislé nebo mají mírně opačný trend. Zajímavé je i vzájemné postavení jednotlivých skupin propojených hodnot, které se nepřekrývá



legenda :	0%modif.	1%modifikátoru	1%modif.+ 0,5%sek.očk.	1%mod+ 1%sek.očk+CuSb
		1,2%mod+0,4%s.očk.	1,2%mod+0,5%s.očk+CuSb	1,5%modif.+0,2%s.očk.

Obr. č. 109 Závislost maximální licí teploty na maximální expanzi L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

a až na tmavomodré hodnoty s 1,5% modifikátoru dodržuje posloupnost odpovídající použitému souboru stupňujících se úprav tavenin. Ze zjištěných trendů se dá odvodit, že čím víc sekundárních úprav v tavenině proběhne, tím menší je vliv licí teploty.

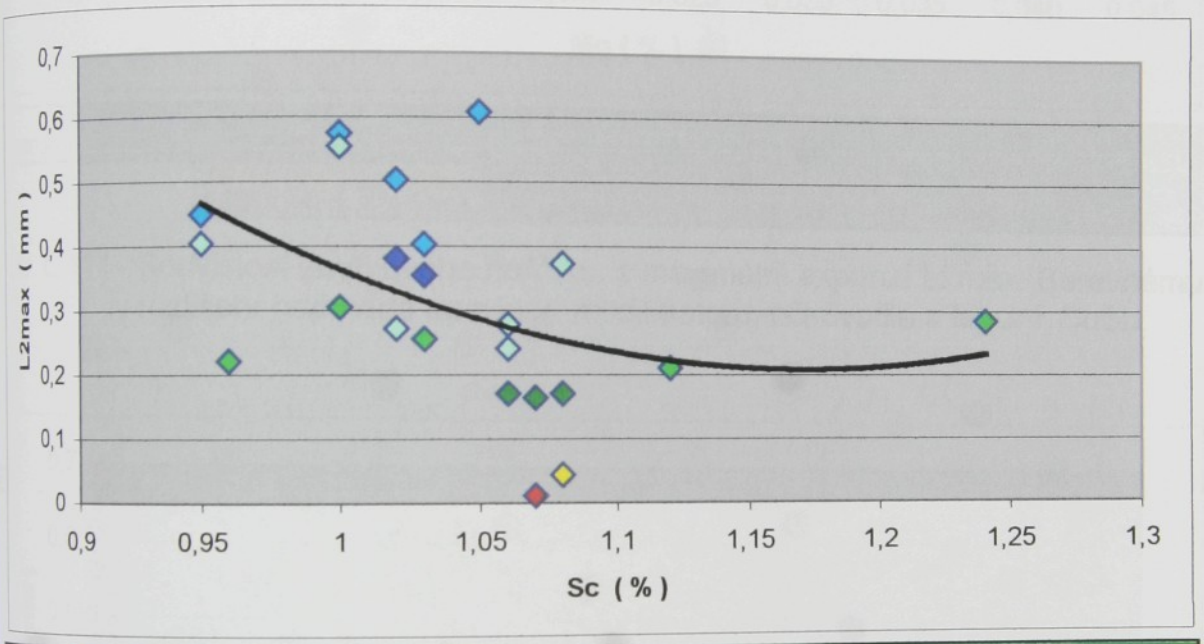
BŠ 3) – souvislost tvaru, rozložení a velikosti grafitu s maximální expanzi L2max

Hledaná souvislost s maximální expanzi L2max, ani s absolutní hodnotu maximální grafitické expanze L2max – L1min, nebyla nalezena.

BŠ 4) – vliv chemického složení slitiny na maximální expanzi L2max

Chemické složení jednotlivých slitin bylo nahrazeno souhrnnou hodnotou - stupněm eutektičnosti Sc. Vliv těchto hodnot na maximální expanzi L2max je vidět na obrázku č.110. Z jejich rozložení vyplývá, že chemické složení slitin nemá téměř žádný vliv na dilatační děje během tuhnutí modifikované taveniny. Tomuto tvrzení odpovídá nalezená nejoptimálnější funkce, která má velice malý stupeň spolehlivosti, (Y – L2max, x – Sc):

$$Y = 5{,}2469.x^2 - 12{,}299.x + 7{,}4148 \qquad R^2 = 0{,}2 \qquad (66)$$

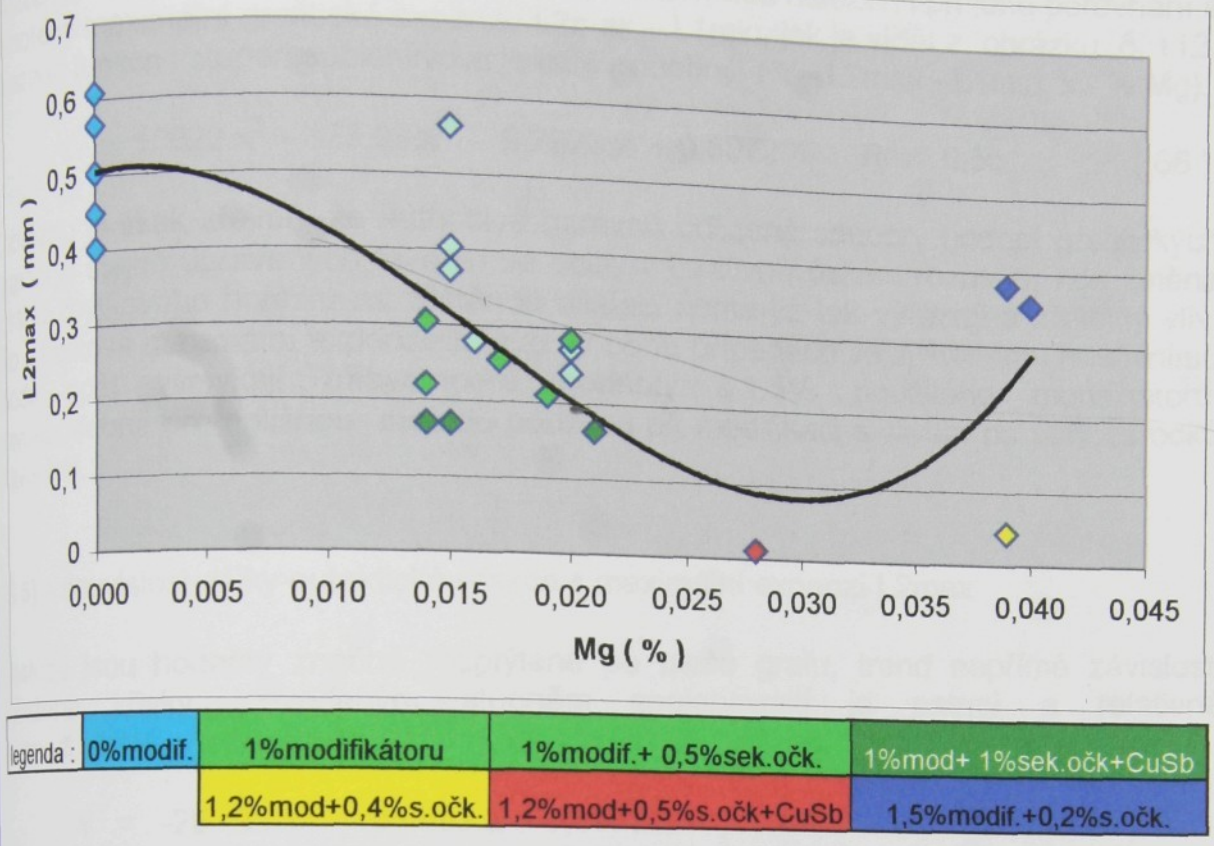


legenda :	0%modif.	1%modifikátoru	1%modif.+ 0,5%sek.očk.	1%mod+ 1%sek.očk+CuSb
		1,2%mod+0,4%s.očk.	1,2%mod+0,5%s.očk+CuSb	1,5%modif.+0,2%s.očk.

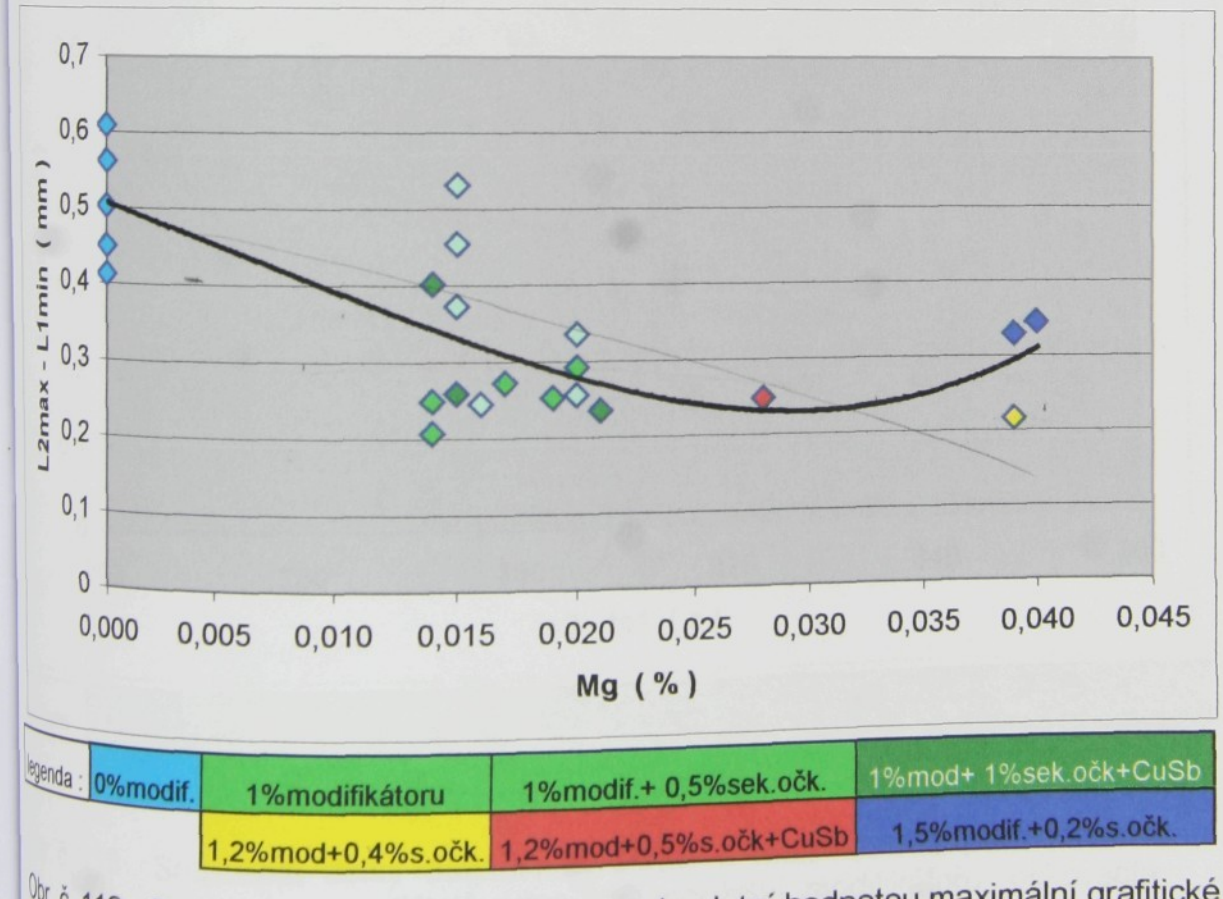
Obr. č. 110 Vliv chemického složení, nahrazeno Sc, na maximální expanzi L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství modif., očko. a legury CuSb.

Zajímavé je opět barevné rozvrstvení výsledků podle provedených úprav taveniny, které se pohybuje v relativně úzkém rozmezí expanzních hodnot oproti širokému rozmezí chemického složení (Sc).Jednotlivé vyznačené barevné „vrstvy" nevykazují žádný výrazný trend. Obdobné výsledky byly zjištěny i při hodnocení vlivu chemického složení na maximální grafitickou expanzi L2max – L1min a proto se tento graf neuvádí.
Při výrobě LKG se klade velký důraz na hodnotu zbytkového hořčíku Mg, který má přímým vliv na tvorbu globulárního grafitu a spolu s tím i na výsledné mechanické vlastnosti litiny. Na obrázku č. 111 je patrný relativně významný vliv zbytkového hořčíku na výsledné hodnoty maximální expanze L2max, který je charakterizován nalezenou optimální polynomickou funkcí třetího stupně s uvedeným stupněm spolehlivosti, (Y – L2max, x - % Mg):

$$Y = 38160.x^3 - 1814{,}5.x^2 + 6{,}0827.x + 0{,}5033 \qquad R^2 = 0{,}55 \qquad (67)$$



Obr. č. 111 Souvislost zbytkového hořčíku s maximální expanzí L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.



Obr. č. 112 Souvislost zbytkového hořčíku s absolutní hodnotou maximální grafitické expanze L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

Proloženou matematickou funkcí byl podobný vliv hořčíku nalezen i při jeho porovnání s hodnotami maximální grafitické expanze L2max – L1min, jak je vidět z obrázku č. 112. Nalezená funkce i stupeň spolehlivosti je také podobný, (Y - L2max - L1min, x - % Mg):

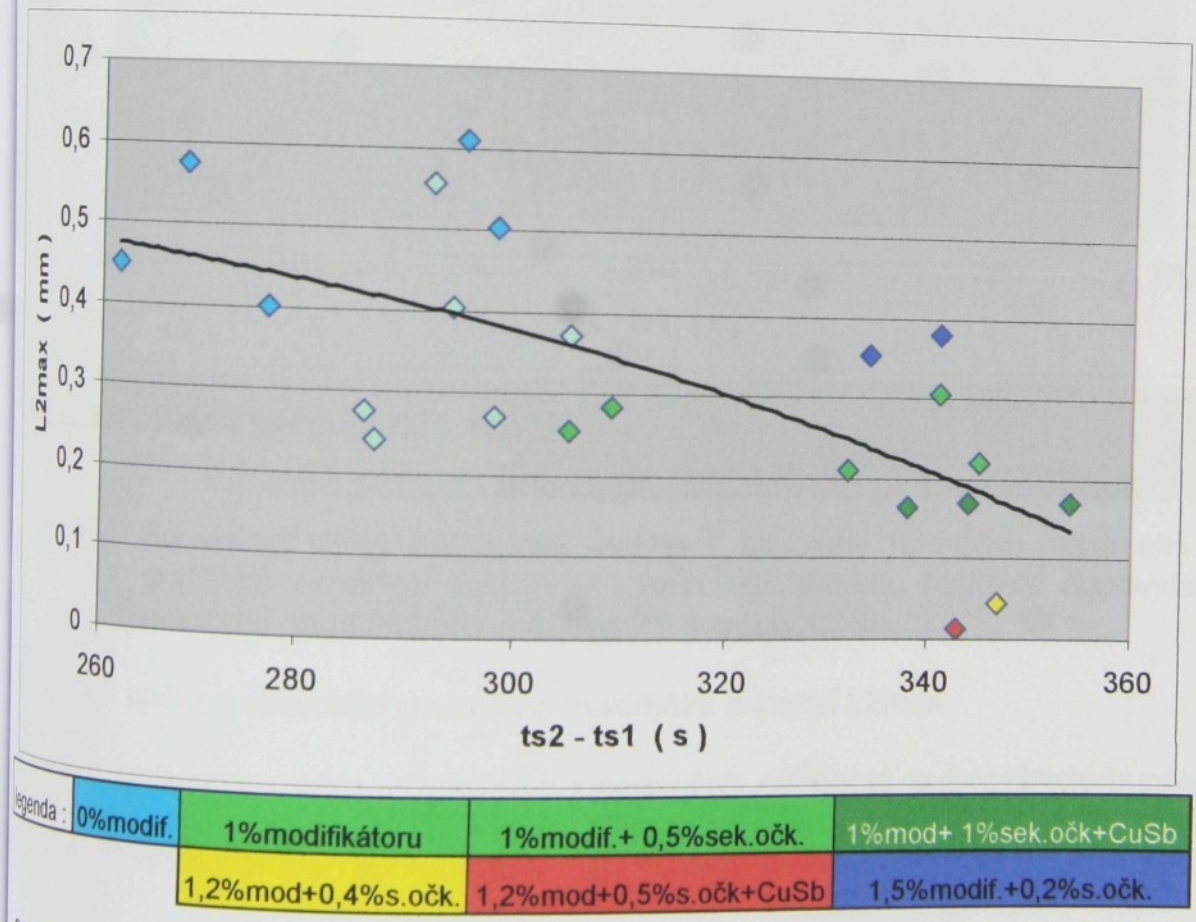
$$Y = 10822.x^3 - 323,93.x^2 - 9,2923.x + 0,5072 \qquad R^2 = 0,55 \qquad (68)$$

Z obrázku je však zřejmé, že jednotlivé barevně odlišené soubory hodnot grafitických expanzí u stejně upravených tavenin se ocitly v relativně úzkém rozmezí, kde změna obsahu zbytkového hořčíku na zjištěnou dilataci nemá již tak výrazný a zřetelný vliv, jako u celkové maximální expanze L2max. V obou případech se zjištěnému relativnímu trendu opět vymykají tmavomodré hodnoty s 1,5% použitého modifikátoru, pravděpodobně pro odlišnou metodu použitou při modifikaci s vlivem na stav zárodků v tavenině.

BŠ 5) – souvislost délky eutektické reakce s maximální expanzí L2max.

Přestože jsou hodnoty značně rozptýlené po ploše grafu, trend nepřímé závislosti proložené křivky s uvedeným stupněm spolehlivosti je patrný a relativně nezanedbatelný, viz obrázek č. 113, (Y – L2max, x – ts2-ts1) :

$$Y = -2E-05.x^2 + 0,0092.x - 0,4976 \qquad R^2 = 0,48 \qquad (69)$$

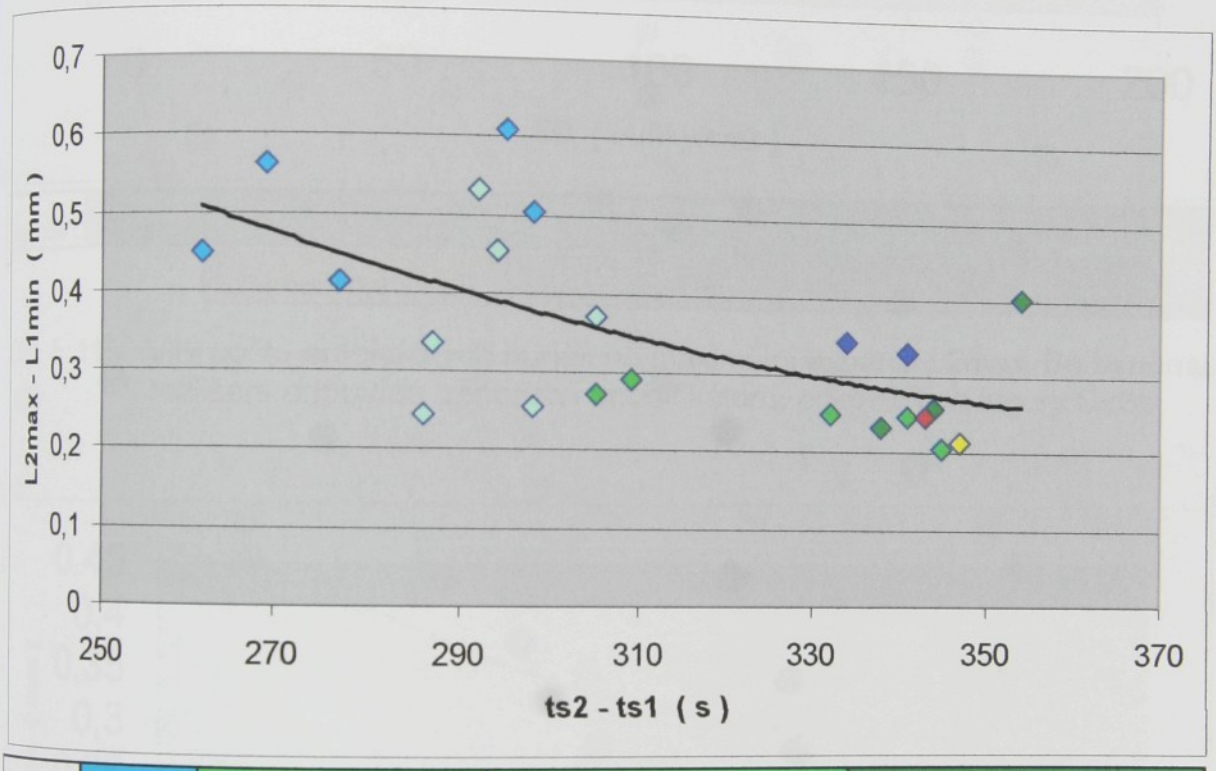


Obr. č. 113 Souvislost délky eutektické reakce s maximální expanzí L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

Z grafu je opět patrné barevné rozložení hodnot náležících ke stejně upraveným taveninám. Čím větší množství modifikátoru a ostatních sekundárních úprav tavenina prodělala, tím delší je eutektická reakce a tím menší je maximální expanze L2max. Výrazný rozdíl je mezi taveninami pouze modifikovanými a modifikovanými spolu s grafitickým očkováním, což potvrzuje význam grafitického očkování i při výrobě LČG či LKG. Z celkového trendu se opět vymykají tavby č. Š32 a Š34.

Při posuzování souvislosti délky eutektické reakce s absolutní hodnotou maximální grafitické expanze L2max – L1min bylo dosaženo obdobného trendu, jako v předešlém případě, viz obrázek č. 114. Proložená funkce má o něco nižší stupeň spolehlivosti, (Y – L2max-L1min , x – ts2-ts1) :

$$Y = -2E-05.x^2 - 0{,}0127.x + 2{,}7112 \qquad R^2 = 0{,}38 \qquad (70)$$



legenda :	0%modif.	1%modifikátoru	1%modif.+ 0,5%sek.očk.	1%mod+ 1%sek.očk+CuSb
		1,2%mod+0,4%s.očk.	1,2%mod+0,5%s.očk+CuSb	1,5%modif.+0,2%s.očk.

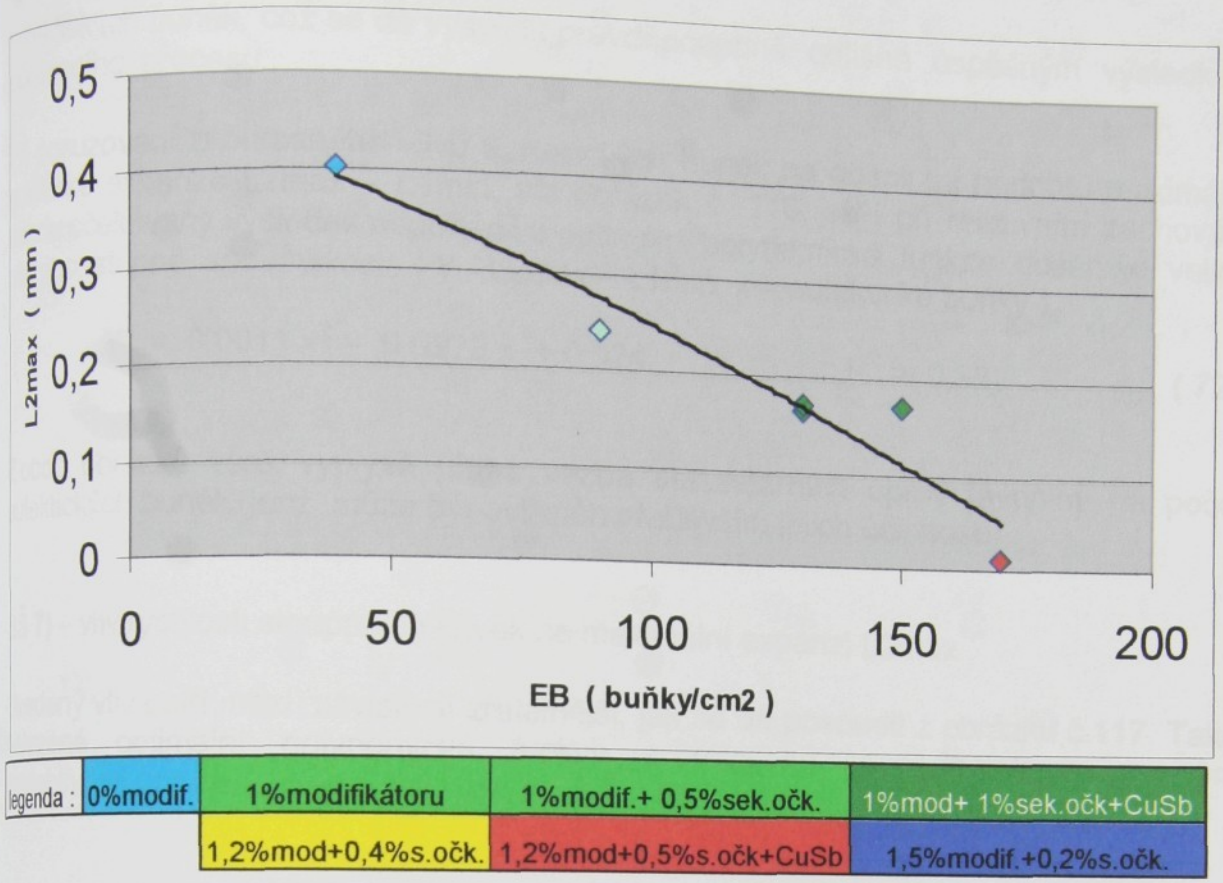
Obr. č.114 Souvislost délky eutektické reakce s absolutní hodnotou maximální grafitické expanze L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

BŠ 6) – vliv počtu eutektických buněk na maximální expanzi L2max

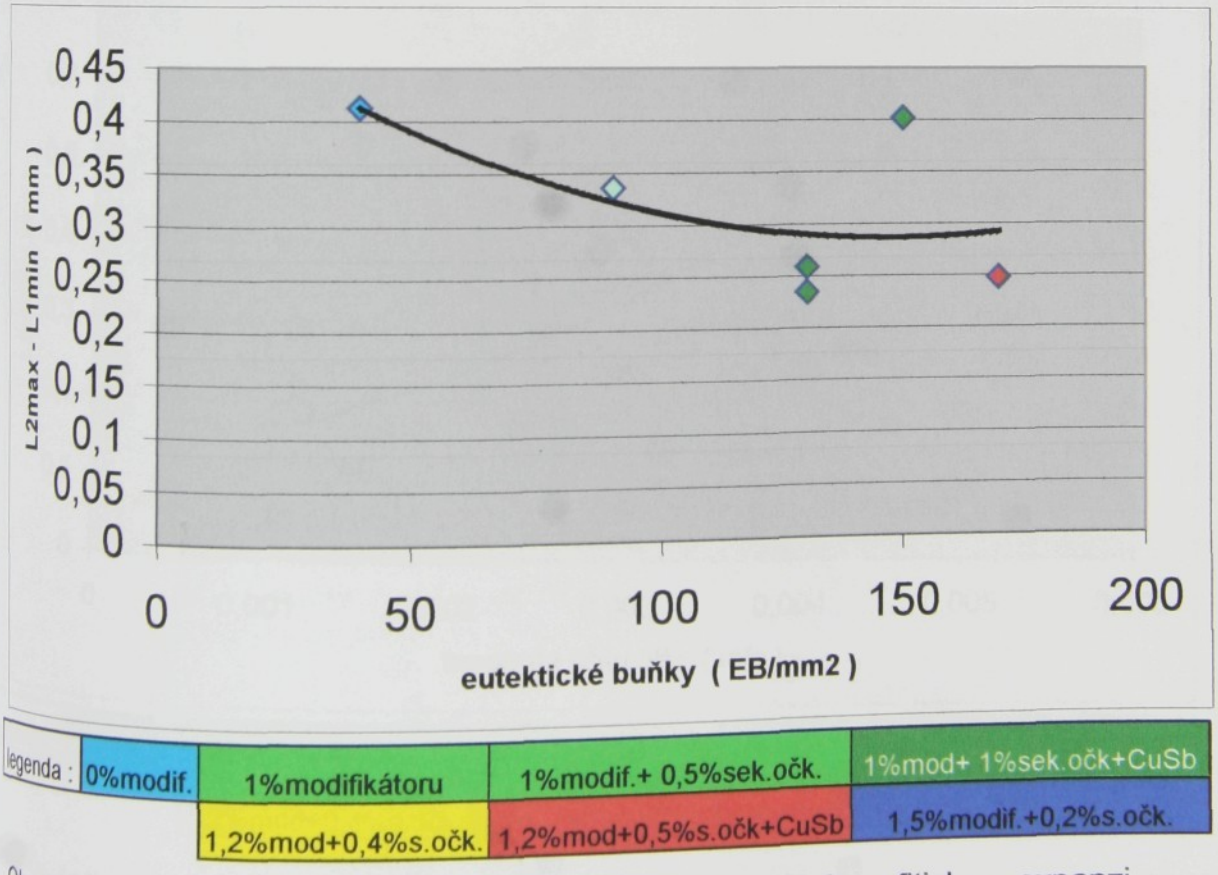
Vzhledem k nízkému počtu vzorků vyhodnocených na počet eutektických buněk je zjištěná závislost na obrázku č.115 pouze orientační a to i přesto, že nalezená funkce má relativně vysoký stupeň spolehlivosti, (Y – L2max, x – eutektické buňky) :

$$Y = -3E-06.x^2 - 0{,}000192.x + 0{,}4739 \qquad R^2 = 0{,}92 \qquad (71)$$

Zjištěný nepřímý trend odpovídá teoretickým představám o pozitivním vlivu většího počtu eutektických buněk na menší expanzi tuhnoucí taveniny. Překvapující je stejná úroveň výsledných expanzí zelených tzn. stejně upravených tavenin při různém počtu



Obr. č. 115 Vliv počtu eutektických buněk na maximální expanzi L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.



Obr. č.116 Vliv počtu eutektických buněk na maximální grafitickou expanzi L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

eutektických buněk, což se dá vysvětlit pravděpodobně odlišně úspěšným výsledkem očkovacího procesu.

Při posuzování zkoumaného vlivu eutektických buněk na absolutní hodnotu maximální grafitické expanze L2max – L1min, viz obrázek č. 116, se i při relativním zachování trendu očekávaný výsledek nepotvrdil a optimální polynomická funkce dosahuje velice nízkého stupně spolehlivosti, (Y - L2max – L1min, x – eutektické buňky) :

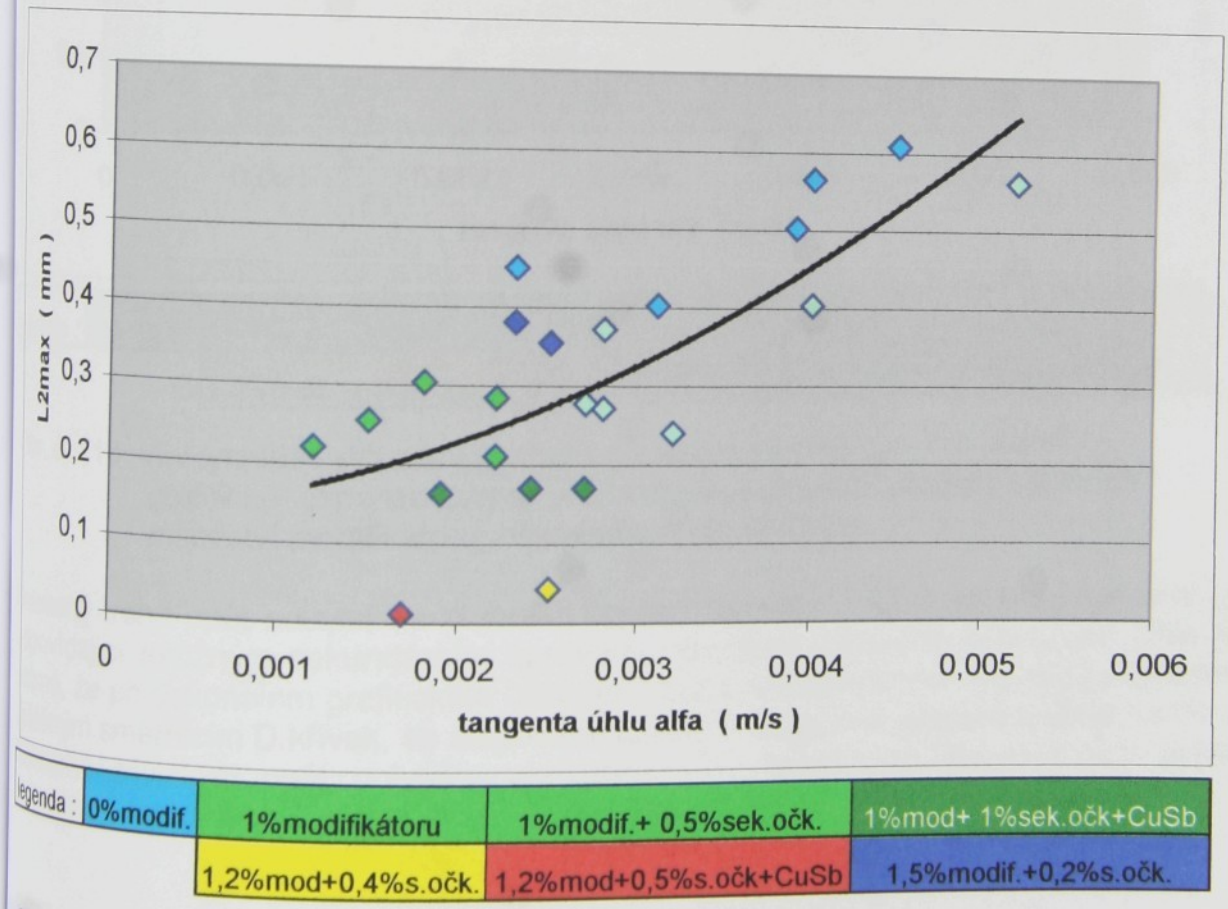
$$Y = 0{,}0011.x^2 - 0{,}0322.x + 0{,}524 \qquad R^2 = 0{,}38 \qquad (72)$$

Z obou obrázků však vyplývá přímá vazba sekundárních úprav taveniny na počet eutektických buněk, jenž může být ovlivněn především jejich účinností.

BŠ 7) – vliv rychlosti stoupání D křivek na maximální expanzi L2max

Uvedený vliv patří mezi závislosti zřetelnější, jak se dá posoudit z obrázku č.117. Také nalezená optimální polynomická funkce s relativně nezanedbatelným stupněm spolehlivosti potvrzuje předpokládanou závislost, (Y – L2max, x – tg úhlu α) :

$$Y = 14737.x^2 + 24{,}076.x + 0{,}1224 \qquad R^2 = 0{,}55 \qquad (73)$$

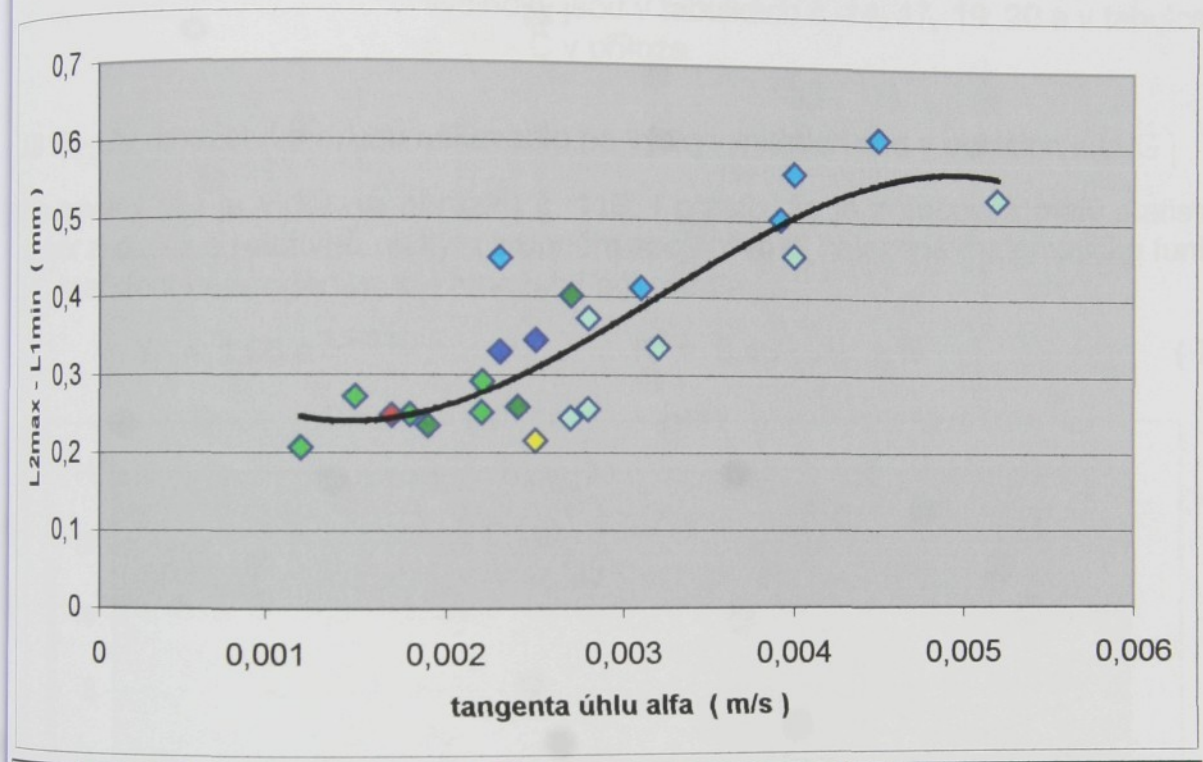


Obr. č. 117 Vliv rychlosti stoupání D křivek na maximální expanzi L2max. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

Z obrázku je opět patrný vliv sekundárních úprav na pozici těchto hodnot v rámci sledovaných veličin. Se stoupajícím množstvím použitého modifikátoru a celkového počtu úprav taveniny klesá hodnota směrnice dilatační křivky přímo úměrně celkové maximální expanzi L2max.

Vliv rychlosti stoupání D křivek na vlastní hodnoty maximální grafitické expanze L2max - L1min se projevuje ještě výraznější závislostí než při hodnocení výsledků celkové maximální expanze L2max, jak vykazuje nalezená optimální funkce s výrazným stupněm spolehlivosti, viz obrázek č. 118,(Y - L2max – L1min, x - tg úhlu α) :

$$Y = -2E - 0{,}7.x^3 + 148760.x^2 - 336{,}81.x + 0{,}4627 \qquad R^2 = 0{,}75 \qquad (74)$$



legenda :	0%modif.	1%modifikátoru	1%modif.+ 0,5%sek.očk.	1%mod+ 1%sek.očk+CuSb
		1,2%mod+0,4%s.očk.	1,2%mod+0,5%s.očk+CuSb	1,5%modif.+0,2%s.očk.

Obr. č. 118 Vliv rychlosti stoupání D křivek na absolutní hodnotu maximální grafitické expanze L2max – L1min. Barevnému rozlišení odpovídá množství modifikátoru, očkovadla a legury CuSb.

Nalezený trend opět souvisí se stupněm úpravy taveniny, i když se jednotlivé barvy, odpovídající totožným sekundárním úpravám, navzájem částečně překrývají. Dále je patrné, že při dokonalém grafitickém očkování, což pravděpodobně odpovídá nejnižším zjištěným směrnicím D křivek, se sledovaná závislost grafitické dilatace snižuje, či mizí. Nalezené závislosti opět potvrdily významný vliv jednotlivých sekundárních úprav taveniny na sledované dilatační děje.

BŠ 8) – vliv množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce

Vazba mezi množstvím eutektických buněk a sklonem LKG k zákalce nebyla nalezena.

4.1.2.3 Porovnání měření na *válcovém špalku* s kvalitou sériových odlitků

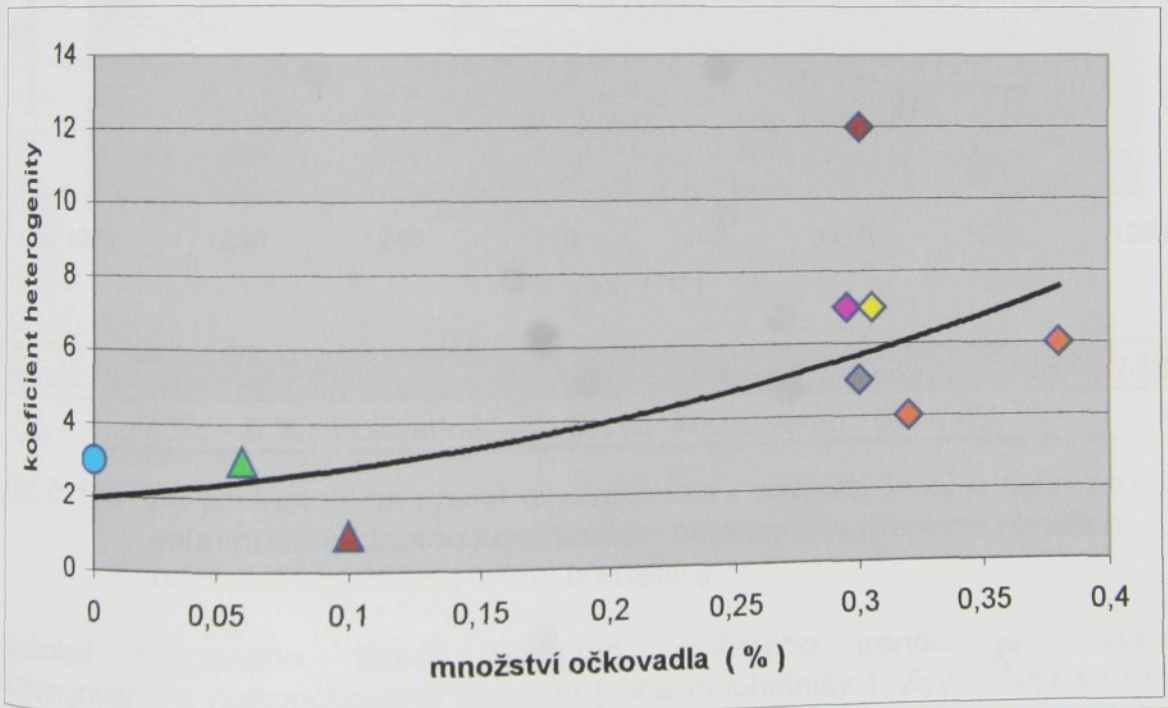
V následujících odstavcích je uvedeno srovnání a ověření získaných dilatačních, ale i jiných hodnot tuhnoucích litin ve zkušební formě *válcového špalku* s úrovní vnitřních vad sériových odlitků slévárny ŠKODA AUTO a.s. Vnitřní vady, zjištěné pomocí RTG defektoskopie, jsou zastoupeny souhrnnou bezrozměrnou hodnotou – koeficientem heterogenity, viz také tabulky č.18 a 19. Čím vyšší je stupeň heterogenity, tím větší počet, nebo rozměr vnitřní vady sériové odlitky z daného souboru obsahovaly. Porovnávané odlitky :

- brzdový buben – LLG , značení odstavců- **AB**, jedná se o zkoušky č.Š63 – 71, jejichž výsledky jsou v tabulkách č. 14, 16, 18, 20 a v tabulce č. 24 - B v příloze.
- rošt – LČG , značení odstavců- **BR**, jedná se o zkoušky č. Š73 – 78, jejichž výsledky jsou v tabulkách č. 14, 17, 19, 20 a v tabulce č. 24 - C v příloze.

AB 1) – vliv množství a druhu očkovadla na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LLG

Posuzovaný vliv je vidět na obrázku č. 119. I přesto, že je zpracován malý statistický soubor zkoušek s relativně nízkým stupněm spolehlivosti nalezené matematické funkce, (Y - koeficient heterogenity, x – množství očkovadla) :

$$Y = 1{,}96\, e^{3{,}546.x} \qquad R^2 = 0{,}46 \qquad (75)$$



Legenda: tavenina | leg.CuSb | LMC | LMC+CuSb | LMC+SUPR | RANKO | SUPERSS

kolečko - 0 %, trojúhelník - do 0,1%, kosočtverec - 0,3-0,4%

Obr. č. 119 Vliv množství a druhu sekundární úpravy taveniny na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.

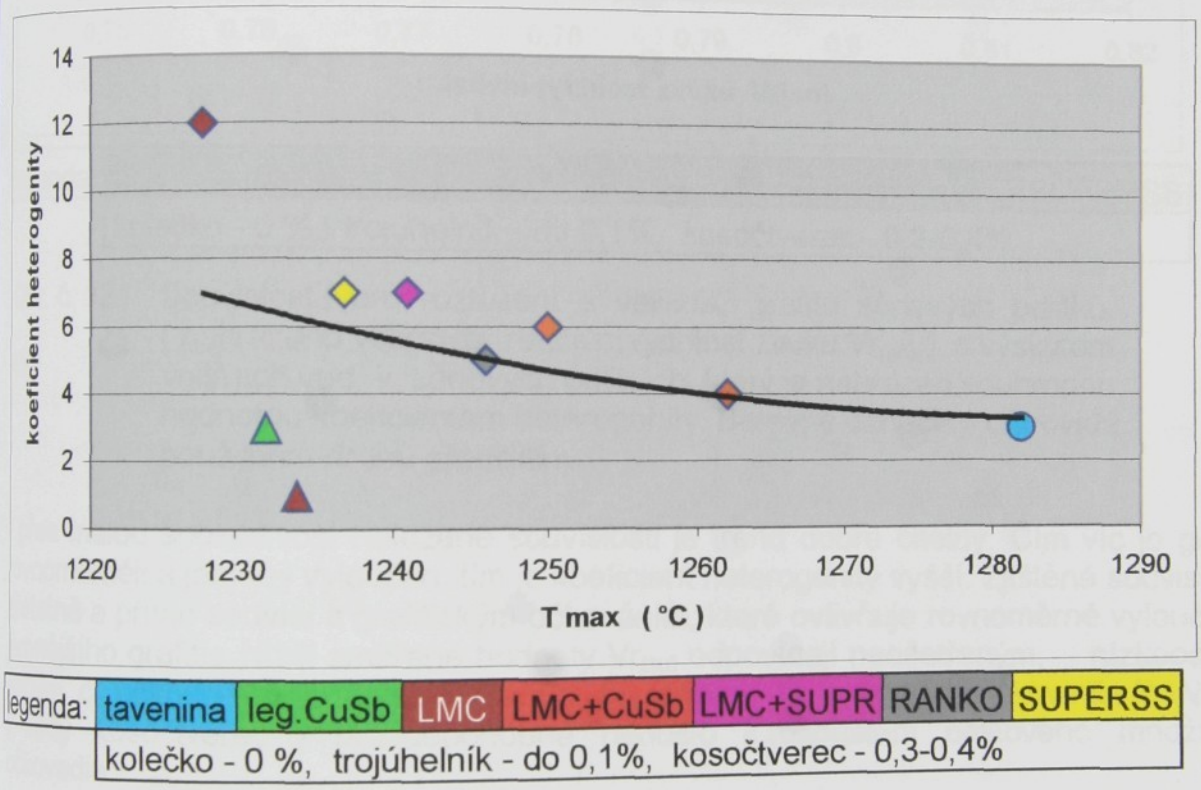
I přesto, že některé hodnoty jsou mimo nalezený trend, má vyhodnocený soubor trendově zřejmou vypovídací hodnotu. Vliv grafitického očkování je tím víc negativní, čím větší množství očkovadla se použilo. Hodnoty zjištěné pod trendovou křivku mohou

být zatíženy chybou množství skutečně rozpuštěného očkovadla. Hodnoty zjištěné nad touto křivkou pravděpodobně vypovídají o výrazném očkovacím efektu. U 0,3% očkovadla LMC byla tato úvaha potvrzena nejvyšší naměřenou hodnotou grafitické expanze L2max-L1min. Je pravděpodobné, že nalezené vnitřní vady odlitků souvisí vedle dalších vlivů se stavem zárodků v tavenině a výrazně s expanzi tuhnoucího grafitu.

AB 2) – vliv licí teploty na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LLG

Z obrázku č. 120 je vliv licí teploty na výskyt vnitřních vad v odlitcích na první pohled patrný. Stupeň spolehlivosti zvolené polynomické funkce všech výsledných hodnot je však velmi nízký, (Y - koeficient heterogenity, x - licí teplota) :

$$Y = 0{,}0011.x^2 - 2{,}8006.x + 1804{,}5 \qquad R^2 = 0{,}15 \qquad (76)$$



legenda: tavenina | leg.CuSb | LMC | LMC+CuSb | LMC+SUPR | RANKO | SUPERSS

kolečko - 0 %, trojúhelník - do 0,1%, kosočtverec - 0,3-0,4%

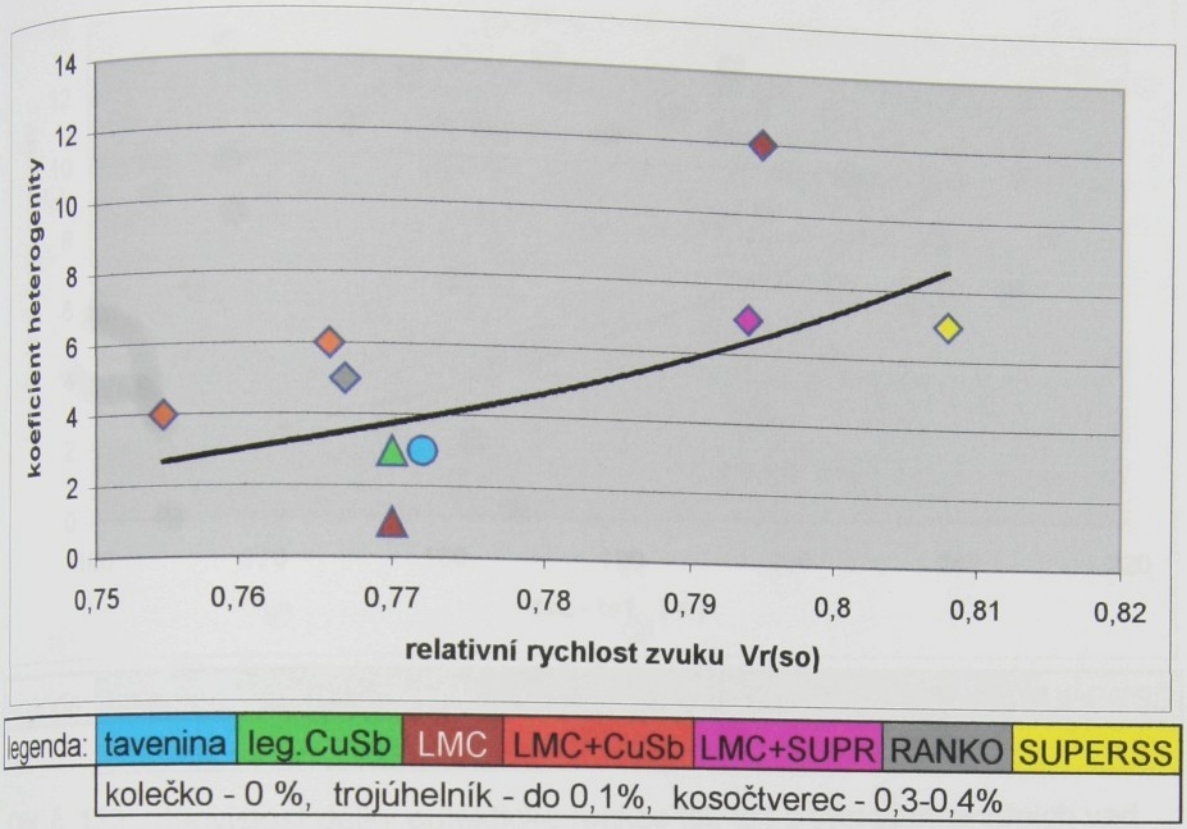
Obr. č. 120 Vliv licí teploty na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou koeficientem heterogenity. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.

Nesoulad nalezeného, téměř ideálního nepřímého trendu, je v hodnotách nízkolegované a nízkoočkované taveniny (oba trojúhelníky). Zvýrazňuje se tak vliv vhodného sekundárního ošetření taveniny, který může být v rámci tolerance vyzkoušených a vhodných licích teplot výraznější.

AB 3) – souvislost kvality grafitu s výskytem vnitřních vad v odlitcích

Kvalita grafitu vyhodnocovaných sériových odlitků je i v tomto případě nahrazena souhrnnou hodnotou relativní rychlosti zvuku $Vr_{(so)}$. Zjištěná relativní souvislost je patrná na obrázku č. 121, nalezená vhodná matematická funkce má malý stupeň spolehlivosti, (Y - koeficient heterogenity, x – relativní rychlost zvuku) :

$$Y = 329{,}94.x^{17{,}123} \qquad R^2 = 0{,}3 \qquad (77)$$



Obr. č. 121 Souvislost tvaru, rozložení a velikosti grafitu sériových odlitků (nahrazeno veličinou relativní rychlost zvuku $Vr_{(so)}$) s výskytem vnitřních vad v sériových odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou koeficientem heterogenity. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.

I přes malou spolehlivost nalezené souvislosti je trend dobře čitelný. Čím víc je grafit rovnoměrněji a jemněji vyloučen, tím je koeficient heterogenity vyšší. Zjištěná souvislost zřetelně a přímo souvisí s grafitickým očkováním, které ovlivňuje rovnoměrné vyloučení jemnějšího grafitu. Nižší změřené hodnoty $Vr_{(so)}$ odpovídají neošetřeným, nízkoočkovaným či očkovaným a dolegovávaným taveninám. U uhlikatého očkovadla RANKO (šedý kosočtverec) pravděpodobně nedošlo k rozpuštění celkového množství očkovadla.

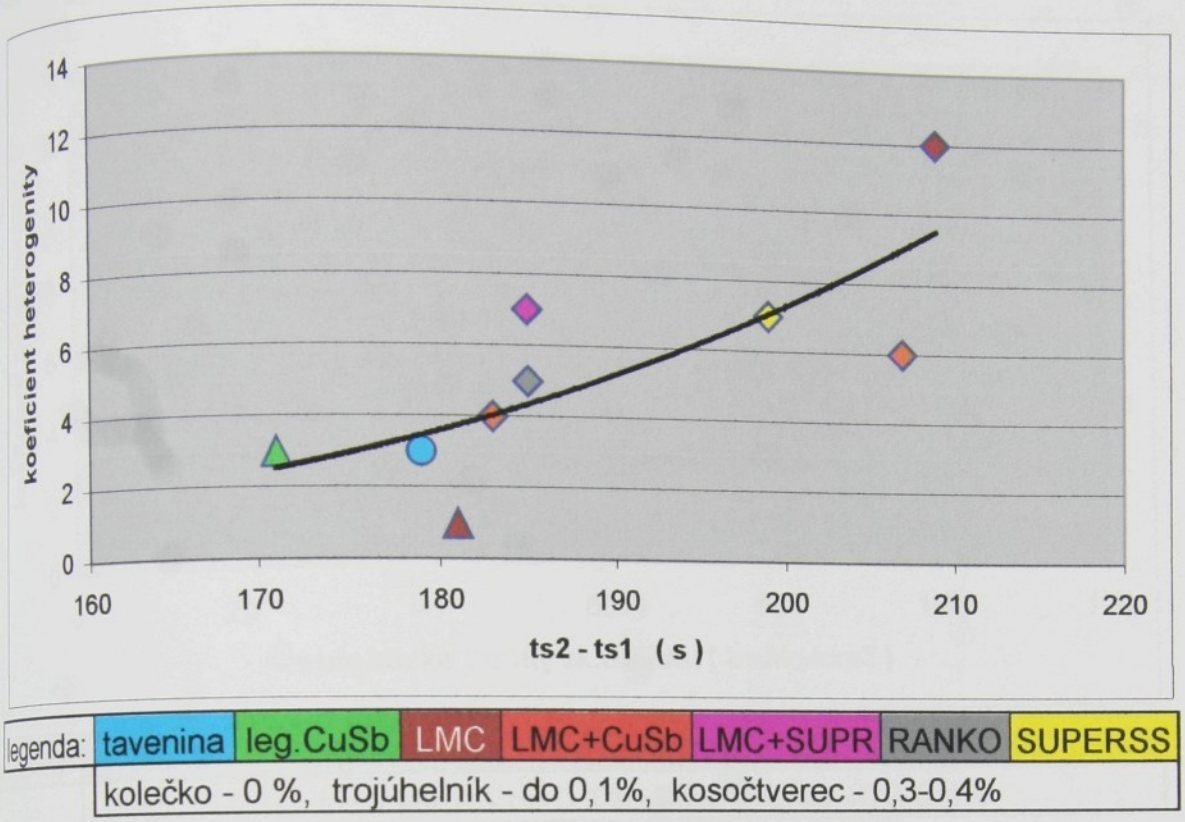
AB 4) – vliv chemického složení slitiny na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LLG

Vzhledem ke zkouškám provedeným při odlévání jedné kvality litiny (Sc = 0,89 – 0,93) nebyl vliv chemického složení na výskyt vnitřních vad v odlitcích vyhodnocován. Záměrem praktické zkoušky nebylo měnit chemické složení.

AB 5) – souvislost délky eutekt. reakce s výskytem vnitřních vad v odlitcích z LLG

Jednou z nejvýraznějších souvislostí s výskytem vnitřních vad v odlitcích je změřená délka eutektické reakce, viz obrázek č. 122. Také nalezená ideální matematická funkce určující trend hledané souvislosti vykazuje již významnější stupeň spolehlivosti, (Y - koeficient heterogenity, x – ts2-ts1) :

$$Y = 0{,}0023.x^2 - 0{,}6776.x + 52 \qquad R^2 = 0{,}63 \qquad (78)$$



Obr. č. 122 Souvislost délky eutektické reakce ts2-ts1 s výskytem vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barevné ozn. odpovídá použitému druhu předslitiny.

Rozložení jednotlivých hodnot i celkový trend je podobný nalezenému trendu vlivu kvality grafitu. Jak z obou grafů vyplývá má délka eutektické reakce přímý vliv na kvalitu grafitu a společně, pravděpodobně především vlivem grafitické expanze, negativně ovlivňují výskyt vnitřních vad odlitků litých do forem s JFBS.

AB 6) – vliv počtu eutektických buněk na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LLG

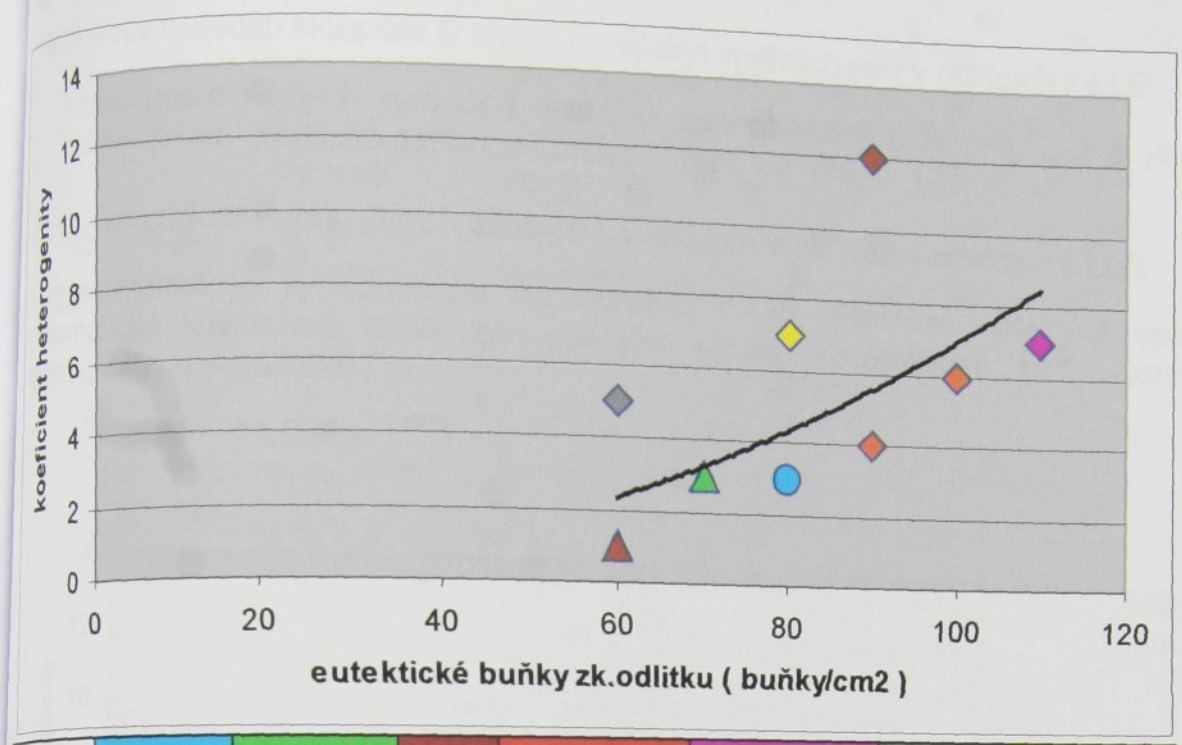
Dalším zajímavým vlivem je počet eutektických buněk v ose zkušebního odlitku související s výskytem vnitřních vad odlitků sériových, viz obrázek č. 123. Nalezená ideální matematická křivka má méně významný stupeň spolehlivosti, (Y - koeficient heterogenity, x – eutektické buňky) :

$$Y = 0{,}0004.x^{2{,}1162} \qquad R^2 = 0{,}4 \qquad (79)$$

I v tomto případě se shoduje trend vlivu většího množství grafitického očkovadla na větší množství eutektických buněk s delší eutektickou reakcí a lepší kvalitou grafitu na větším výskytu vnitřních vad v odlitcích. Vzhledem k nepřímému hodnocení výsledků měření na zkušebních odlitcích odlévaných do CT forem bylo provedeno porovnání počtu těchto buněk v ose zkušebního odlitku s počtem eutektických buněk v okolí zjištěných vad homogenity u odlitků sériových, odlévaných do JBFS, viz obrázek č. 124. Přestože jsou absolutní hodnoty počtu buněk rozdílné, pravděpodobně vlivem teplotního spádu vyvolaného rozdílnou hmotností odlitků a materiálem forem, je stupeň spolehlivosti nejvhodnější nalezené matematické funkce proložené křivky relativně významný, (Y - eutektické buňky zkuš. odlitků, x – eutektické buňky sér. odlitků) :

$$Y = 0{,}0009.x^2 + 0{,}1313.x + 43{,}386 \qquad R^2 = 0{,}7 \qquad (80)$$

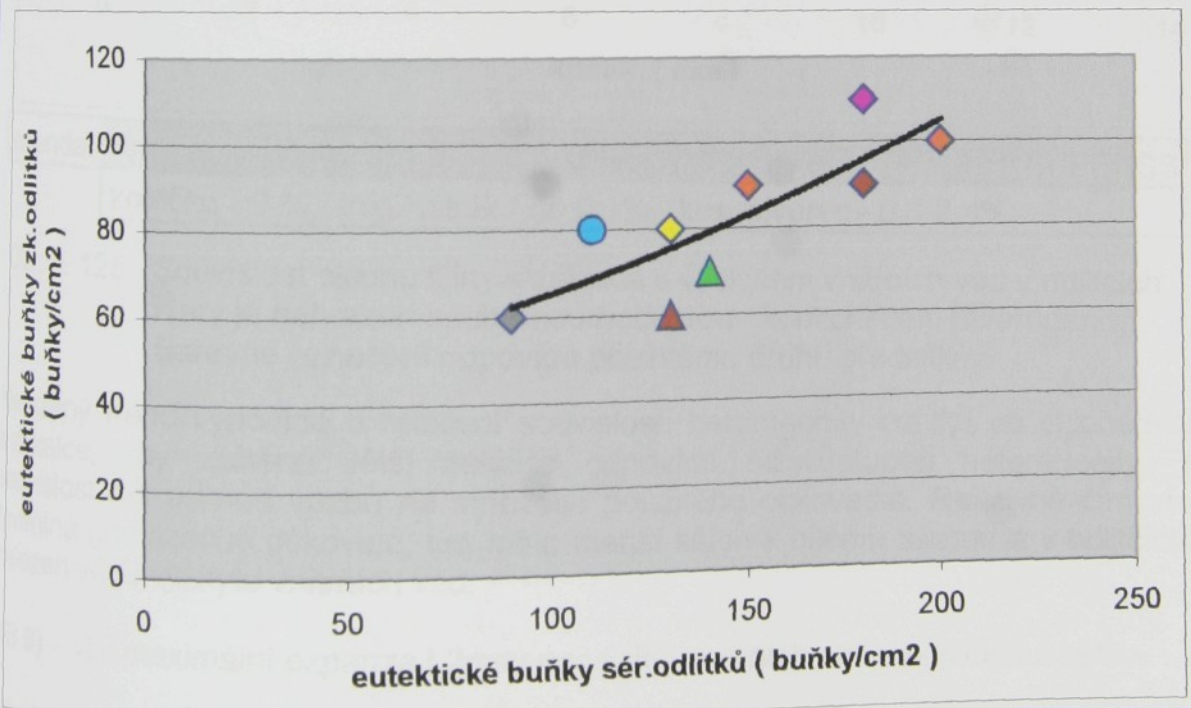
Na základě tohoto souladu tedy můžeme konstatovat, že zjištěný trend na obrázku č. 123 má relativně významnou vypovídací hodnotu.



legenda: tavenina | leg.CuSb | LMC | LMC+CuSb | LMC+SUPR | RANKO | SUPERSS

kolečko - 0 %, trojúhelník - do 0,1%, kosočtverec - 0,3-0,4%

Obr. č. 123 Souvislost počtu eutektických buněk v ose zkušebního odlitku s výskytem vnitřních vad v odlitcích sériových, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.



legenda: tavenina | leg.CuSb | LMC | LMC+CuSb | LMC+SUPR | RANKO | SUPERSS

kolečko - 0 %, trojúhelník - do 0,1%, kosočtverec - 0,3-0,4%

Obr. č. 124 Souvislost počtu eutektických buněk v ose zkušebního odlitku s počtem eutektických buněk v okolí vnitřních vad u sériových odlitků. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.

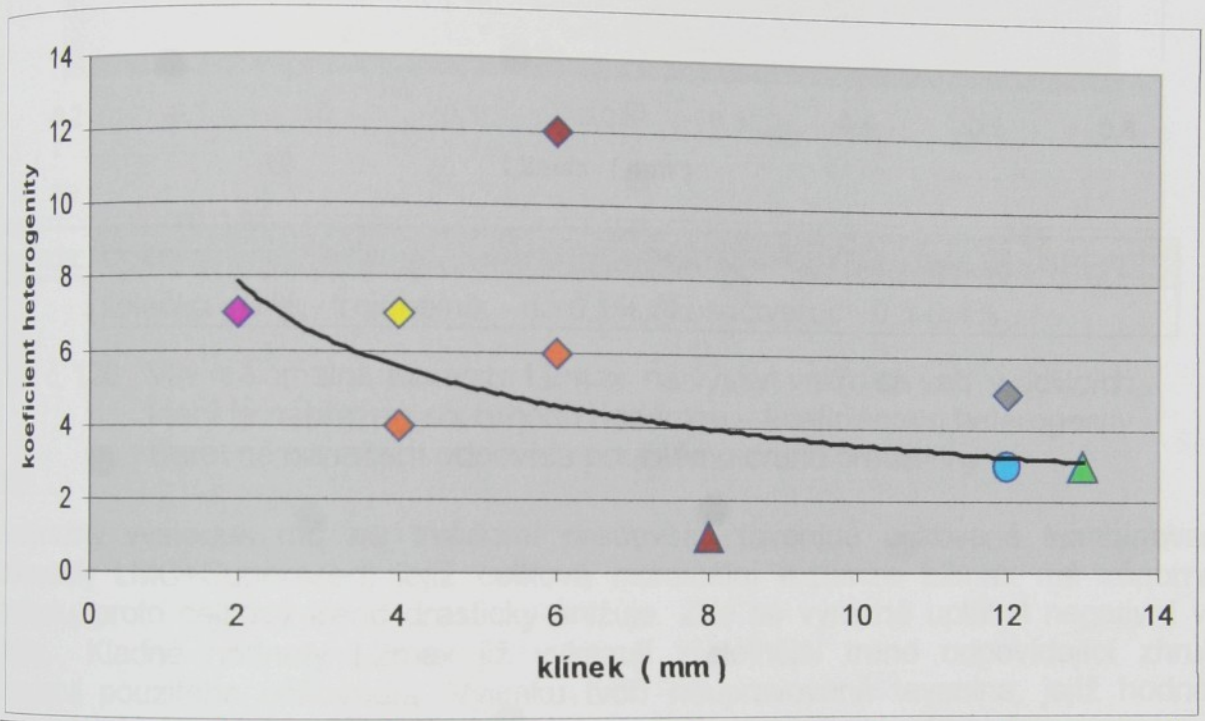
AB 7) – vliv rychlosti stoupání D křivek na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LLG

Rozložení posuzovaných hodnot i trend je zanedbatelný (R^2 =0,02) a je téměř identický s vlivem grafitické expanze L2max-L1min, viz obr. č. 127.

AB 8) – souvislost sklonu litiny k zákalce s výskytem vnitř. vad v odlitcích z LLG

Tato souvislost je vyhodnocena na obrázku č.125. Přestože nalezená optimální matematická křivka má téměř zanedbatelný stupeň spolehlivosti, (Y - koeficient heterogenity, x – zákalka) :

$$Y = 11{,}059.x^{-0{,}4962} \qquad R^2 = 0{,}2 \qquad (81)$$



legenda:	tavenina	leg.CuSb	LMC	LMC+CuSb	LMC+SUPR	RANKO	SUPERSS
	kolečko - 0 %, trojúhelník - do 0,1%, kosočtverec - 0,3-0,4%						

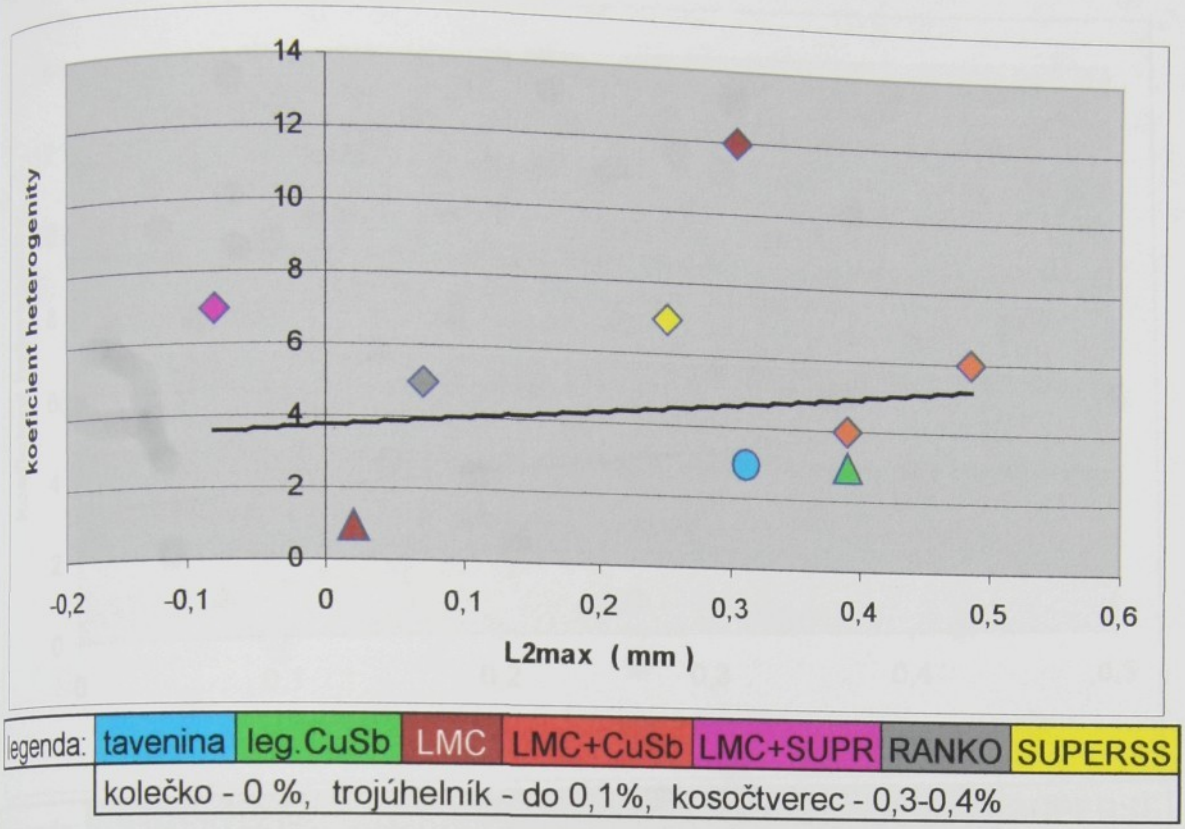
Obr. č. 125 Souvislost sklonu litiny k zákalce s výskytem vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.

Nalezený trend vypovídá o relativní souvislosti heterogenity odlitků se sklonem litiny k zákalce, kdy zjištěné větší zákalce odpovídá nižší stupeň heterogenity. Tato souvislost má přímou vazbu na množství použitého očkovadla. Relativně čím víc se tavenina grafitizačně očkovala, tím měla menší sklon k bílému tuhnutí a v odlitcích byl nalezen větší výskytu vnitřních vad.

AB 9) – vliv maximální expanze L2max na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LLG

Důležitým a sledovaným dějem během tuhnutí upravené taveniny je dilatace odlitku, u které se předpokládá její přímý vliv na vznik vnitřních vad v odlitcích.
Z obrázku č. 126 je však patrné, že nalezená matematická křivka má vlivem velkého rozptylu souboru porovnávaných hodnot téměř zanedbatelný stupeň spolehlivosti, (Y - koeficient heterogenity, x - L2max) :

$$Y = 3{,}7462\, e^{0{,}6863.x} \qquad R^2 = 0{,}04 \qquad (82)$$



Obr. č. 126 Vliv maximální expanze L2max na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.

Nevýrazný výsledek má na svědomí především tavenina očkovaná kombinovaně očkovadly LMC+Superssed, jejíž celková maximální expanze L2max má zápornou hodnotu, proto celkový trend drasticky snižuje. Zde se výrazně uplatnil negativní vliv formy. Kladné hodnoty L2max již vykazují zřetelnější trend odpovídající zhruba množství použitého očkovadla. Výjimku tvoří neupravovaná tavenina, jejíž hodnota L2max je téměř totožná s hodnotou taveniny očkované 0,3% LMC. Její výsledek je pravděpodobně ovlivněn zatím nepostihnutelným stavem zárodků po tavícím procesu a dilatací formy souhrnně obsažené ve výsledné hodnotě L2max.

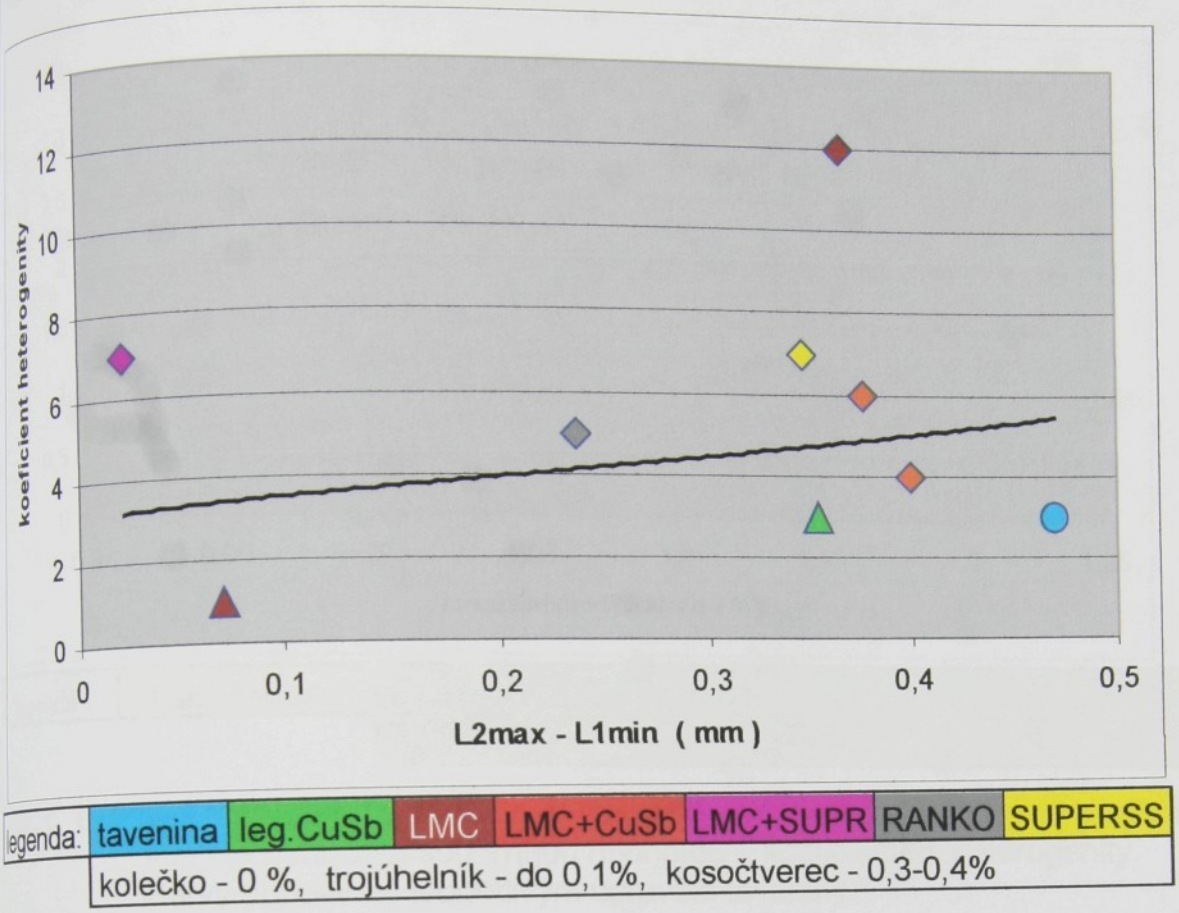
AB 10) – vliv grafitické exp.L2max-L1min na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LLG

Hledaný vliv je vyhodnocený na obrázku č. 127. Pro uvedený soubor hodnot byla i v tomto případě stanovena matematická funkce, jejíž stupeň spolehlivosti je zanedbatelný, (Y - koeficient heterogenity, x - L2max-L1min) :

$$Y = 3{,}1194\, e^{1{,}1784.x} \qquad R^2 = 0{,}06 \qquad (83)$$

Až na výjimky souvisí předpokládaný trend s množstvím použitého očkovadla a jeho dokonalého rozpuštění. S notnou dávkou tolerance se dá konstatovat, že u sekundárně upravovaných tavenin má větší grafitická expanze přímý vliv na větší výskyt vnitřních vad v odlitcích.

Z obrázků č. 126 a 127 lze vysledovat relativní podobnost rozložení hodnot celkové maximální expanze L2max a hodnot grafitické expanze L2max- L1min vůči výskytu vnitřních vad v odlitcích. To znamená, že vliv dilatace formy spolu s dilatací předeutektickou není natolik závažný, aby zásadně změnil výsledný výskyt vad v odlitcích. Celé hodnocení se tímto částečně zjednodušuje – zužuje se na vliv dilatace tuhnoucí taveniny v rámci sledované a vyhodnocené grafitická expanze. Zde se však



Obr. č. 127 Vliv grafitické expanze L2max-L1min na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou koeficientem heterogenity. Barevné označení odpovídá použitému druhu předslitiny.

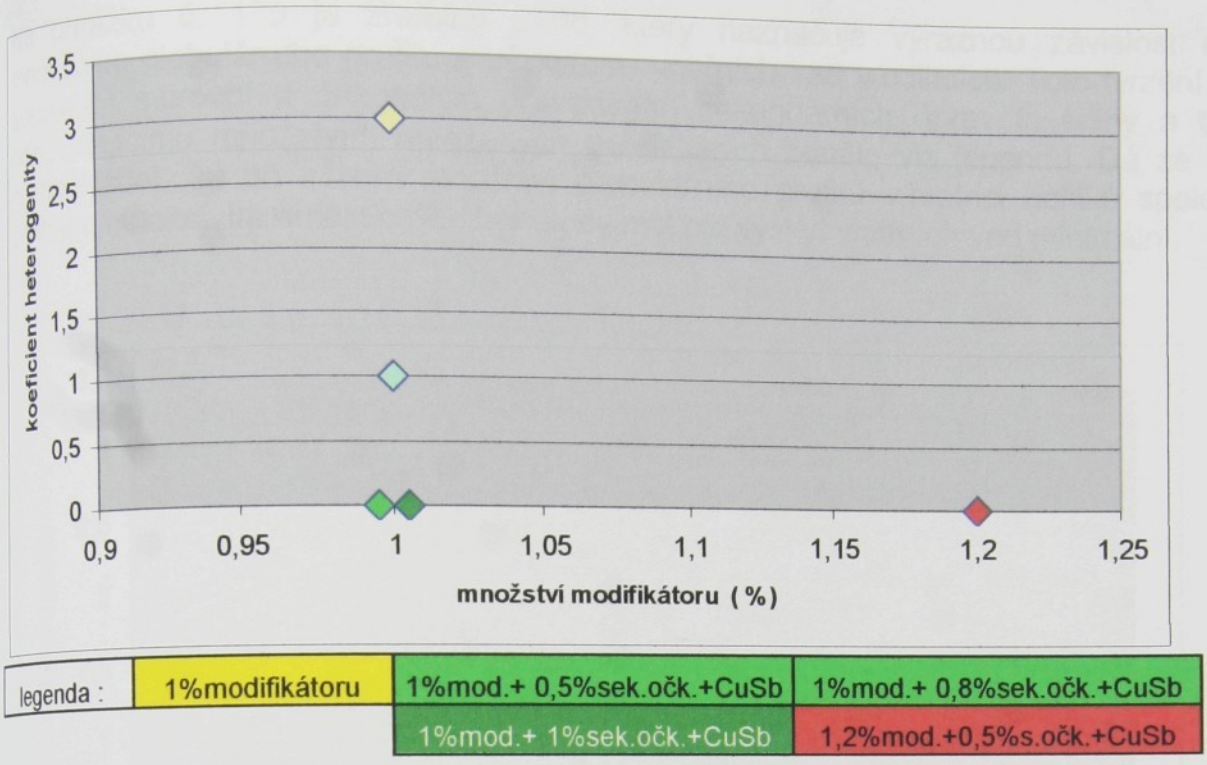
dostáváme do slepé uličky vlivem současné nereálné možnosti postihnou stav zárodků v tavenině před (tavící a udržovací proces, stupeň přehřátí) i po provedených sekundárních úpravách (očkování, legování). Nalezené odchylky se pravděpodobně prozatím nedají jinak uspokojivě vysvětlit a další měření se v budoucnosti musí zabývat detailněji i těmito otázkami.

BR 1) – vliv množství a druhu očkovadla na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LČG

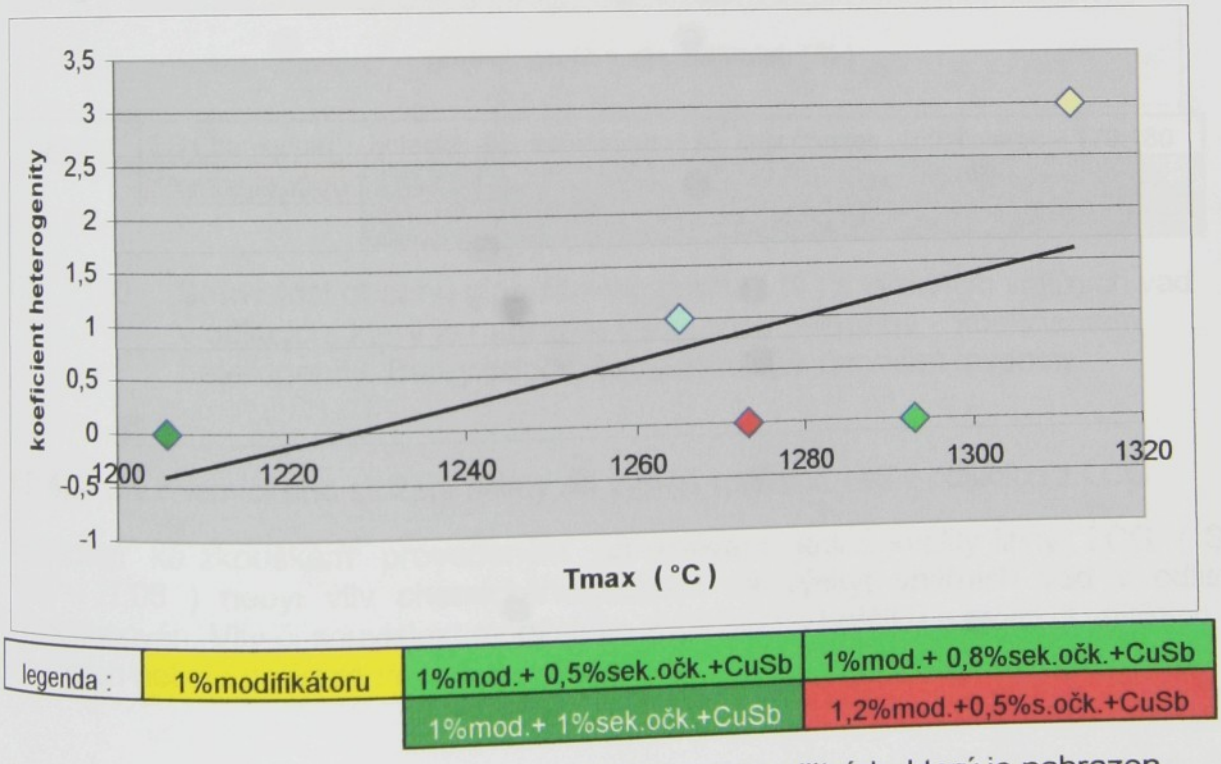
Vzhledem k malému souboru posuzovaných hodnot budeme zjištěné vlivy a souvislosti u hodnocené LČG porovnávat většinou pouze trendově. Z barevného rozlišení hodnot na obrázku č. 128 vyplývá, že vedle vlastní modifikace má na výskyt vnitřních vad v posuzovaných odlitcích kladný vliv grafitické očkování. Heterogenita odlitku při provedeném 0,5% grafitickém očkování může být způsobena také nedokonalým rozpuštěním očkovadla.

BR 2) – vliv licí teploty na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LČG

Nalezený trend odpovídá obecnému poznání, že čím je licí teplota u LLG nižší, tím klesá riziko vzniku vnitřních vad v odlitcích, viz obrázek č. 129. Výsledek zjištění je však pouze relativní, protože souvisí i se sekundární úpravou taveniny, která byla u provedených zkoušek odlišná.



Obr. č. 128 Vliv množství modifikátoru a očkovadla na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

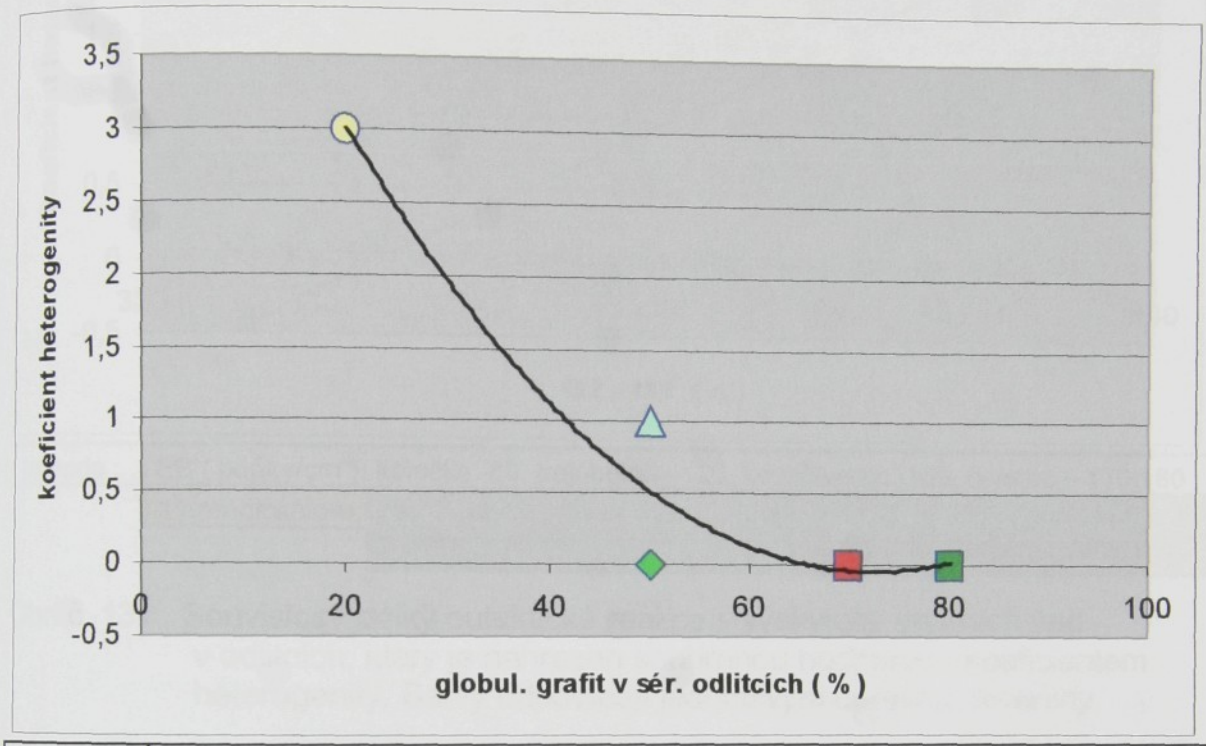


Obr. č. 129 Vliv licí teploty na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

BR 3) – souvislost kvality grafitu s výskytem vnitřních vad v odlitcích z LČG

Kvalita grafitu se posuzovala pomocí souhrnné veličiny relativní rychlostí zvuku Vr a podle množství globulárního grafitu v matrici sériových odlitků. Při hledání souvislosti výskytu vnitřních vad s hodnotou rychlosti zvuku Vr nebyl očekávaný trend nalezen.

Na obrázku č. 130 je zřetelný trend, který naznačuje výraznou závislost mezi množstvím globulárního grafitu a výskytem vnitřních vad v odlitcích. Toto tvrzení je v souladu i s úrovní a dokonalým provedením sekundárních úprav taveniny a tomu odpovídajícímu množstvím nalezených eutektických buněk, viz legenda. Dá se tedy předpokládat, že při větším množství globulárního grafitu v matrici odlitků společně s větším množstvím eutektických buněk by měl být výskyt vnitřních vad minimální.



legenda :	EB (buňky/cm^2): kolečko -80, trojúhelník -120, kosočtverec -150, čtverec – 170,180		
	1%modifikátoru	1%mod.+ 0,5%sek.očk.+CuSb	1%mod.+ 0,8%sek.očk.+CuSb
		1%mod.+ 1%sek.očk.+CuSb	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb

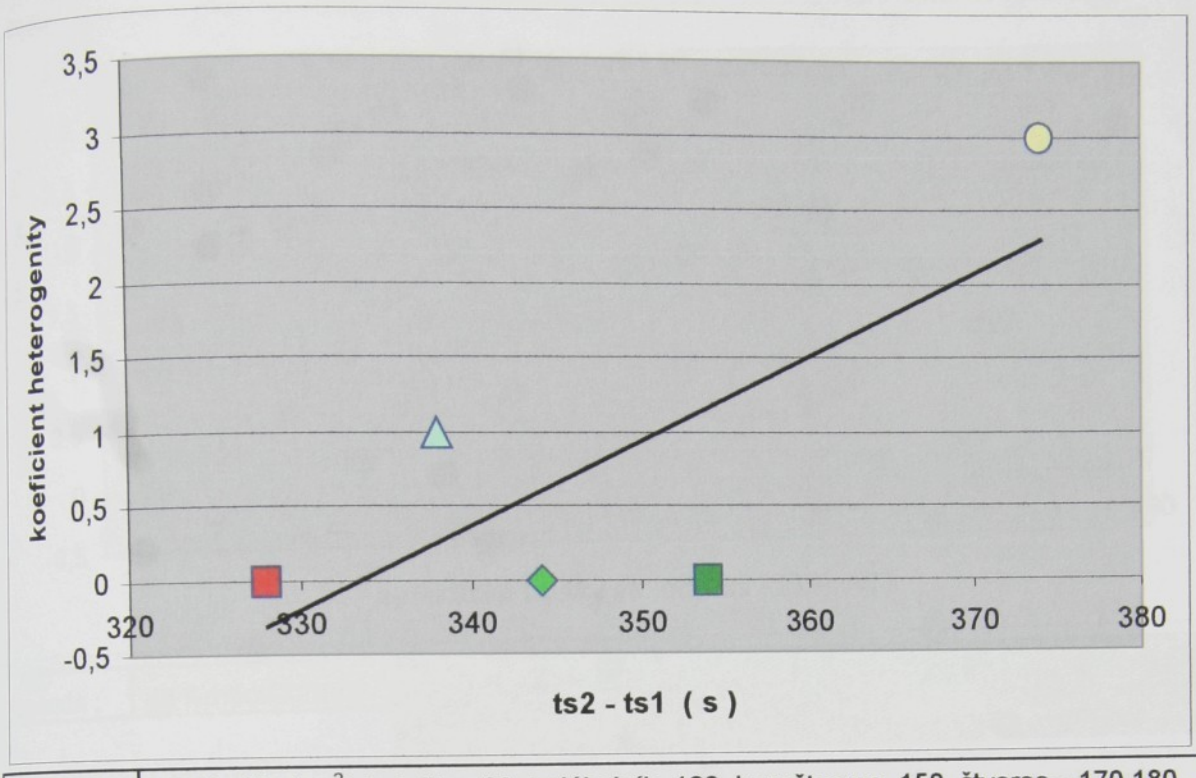
Obr. č.130 Souvislost obsahu globulárního grafitu (%) s výskytem vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

BR 4) – vliv chemického složení slitiny na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LČG

Vzhledem ke zkouškám provedeným při odlévání jedné kvality litiny LČG, (Sc = 1,03 – 1,08) nebyl vliv chemického složení na výskyt vnitřních vad v odlitcích vyhodnocován. Vliv či souvislost množstvím zbytkového hořčíku na výskyt vnitřních vad v odlitcích nebyla prokázána.

BR 5) – souvislost délky eutekt.reakce s výskytem vnitřních vad v odlitcích z LČG

Vyhodnocení hledané souvislosti je patrné na obrázku č. 131. Z nalezeného trendu vyplývá, že čím delší bude eutektická reakce, tím je větší pravděpodobnost výskytu vnitřních vad v odlitcích. Při hlubším studiu souvislostí byla nalezená přímá vazba mezi délkou eutektické reakce a maximální licí teplotou. Většina veličin je navzájem svázaná, a proto je velmi obtížné nalézt nejvýraznější základní veličinu, jejímž řízením a působením by se výskyt vnitřních vad dal ovládat.



legenda :	EB (buňky/cm^2): kolečko -80, trojúhelník -120, kosočtverec -150, čtverec – 170,180		
	1%modifikátoru	1%mod.+ 0,5%sek.očk.+CuSb	1%mod.+ 0,8%sek.očk.+CuSb
		1%mod.+ 1%sek.očk.+CuSb	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb

Obr. č. 131 Souvislost délky eutektické reakce s výskytem vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

BR 6) – vliv počtu eutektických buněk na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LČG

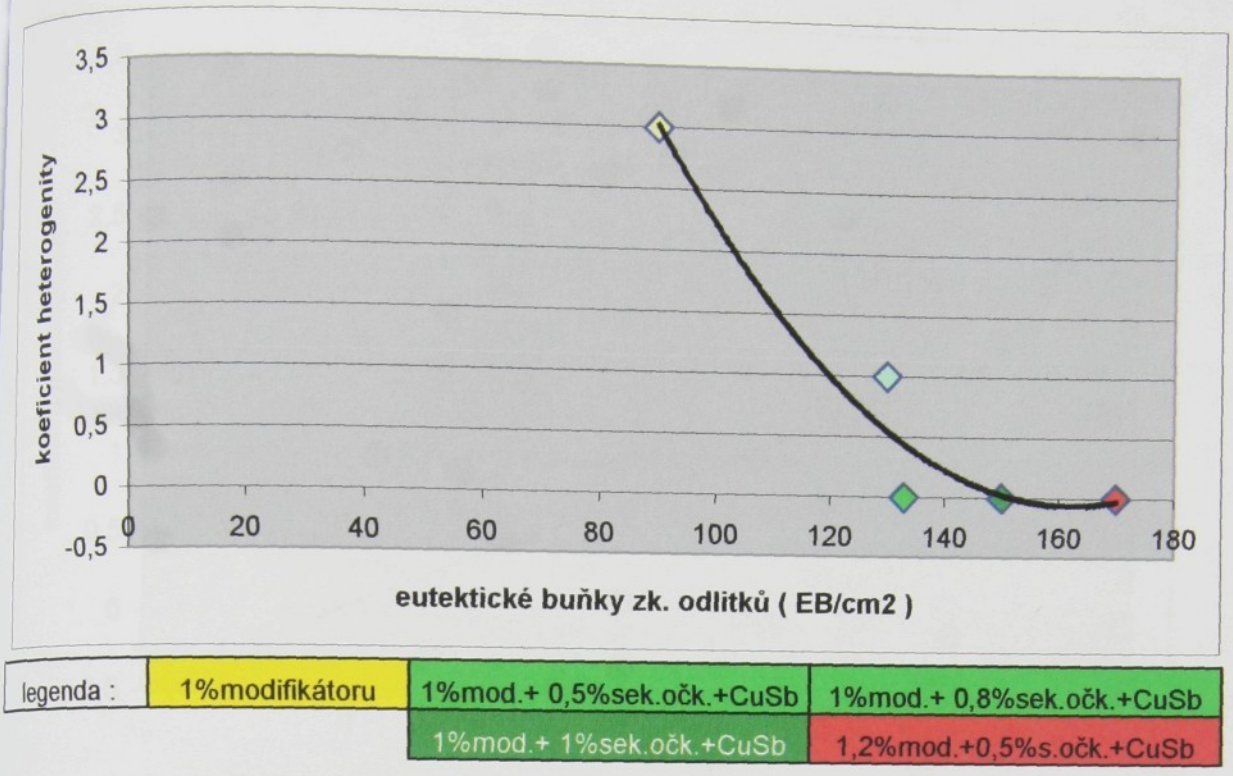
Posuzovaný vliv je patrný na obrázku č. 132 . Zjištěný trend odpovídá relativně přímé vazbě výskytu vnitřních vad v sériových odlitcích na počet eutektických buněk zkušebního odlitku, což souvisí i s úrovní sekundárních úprav tavenin zvýrazněných barevnou odlišností, viz legenda. I přes malý soubor posuzovaných hodnot lze naznačit, že čím méně eutektických buněk na jmenovité ploše zkušebního odlitku bylo nalezeno, tím větší je předpoklad výskytu vnitřních vad v sériových odlitcích.
Vzhledem k nepřímému hodnocení výsledků měření na zkušebních odlitcích odlévaných do CT forem, bylo provedeno porovnání počtu těchto buněk v ose zkušebního odlitku s počtem eutektických buněk v okolí zjištěných vad homogenity u odlitků sériových, odlévaných do JBFS, viz obrázek č. 133. Nalezený stupeň spolehlivosti nejvhodnější matematické funkce proložené křivky je vysoce významný, (Y – koeficient heterogenity, x – EB):

$$Y = 0{,}697.x + 36{,}424 \qquad R^2 = 0{,}91 \qquad (84)$$

Na základě zjištěných výsledků lze konstatovat, že naznačený trend na obrázku č. 132 má relativně dobrou vypovídací hodnotu.

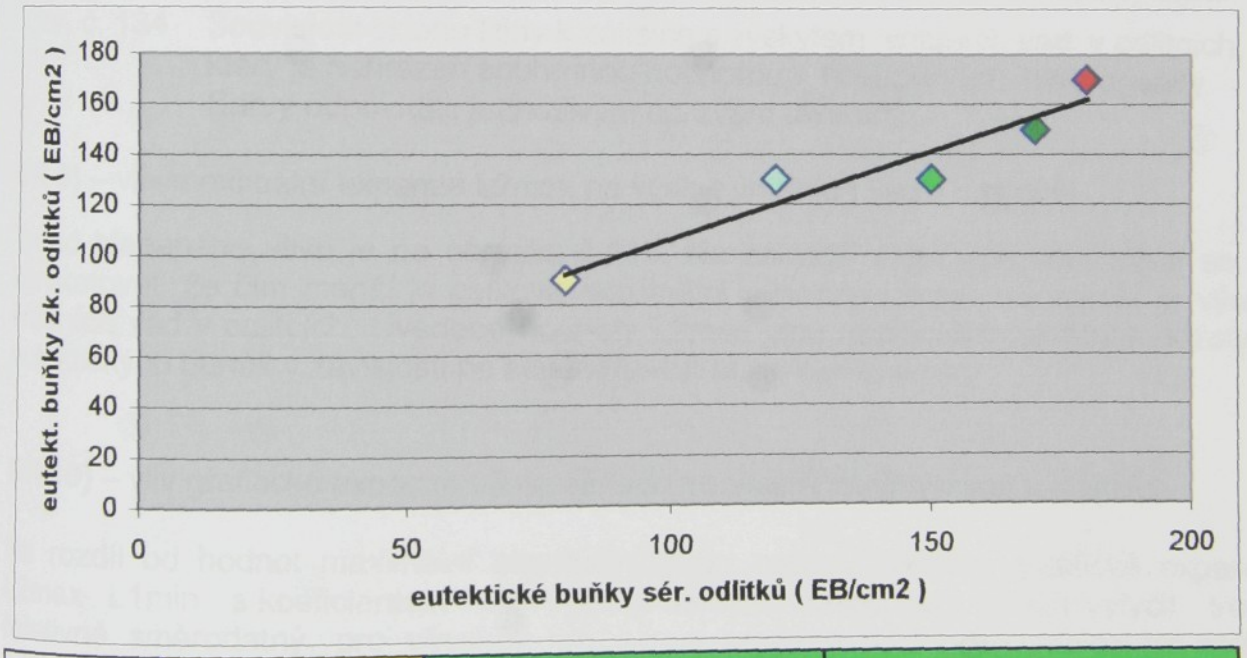
BR 7) – vliv rychlosti stoupání D křivek na výskyt vnitřních vad v odlitcích z LČG

Uvedený vliv má téměř identické rozložení posuzovaných hodnot i trend jako souvislost sklonu litiny k zákalce, viz obr. č. 134 a proto nebyl uveden.



legenda :	1%modifikátoru	1%mod.+ 0,5%sek.očk.+CuSb	1%mod.+ 0,8%sek.očk.+CuSb
		1%mod.+ 1%sek.očk.+CuSb	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb

Obr. č. 132 Souvislost počtu eutektických buněk zk. odlitků s výskytem vnitřních vad v odlitcích sériových, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koef. heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

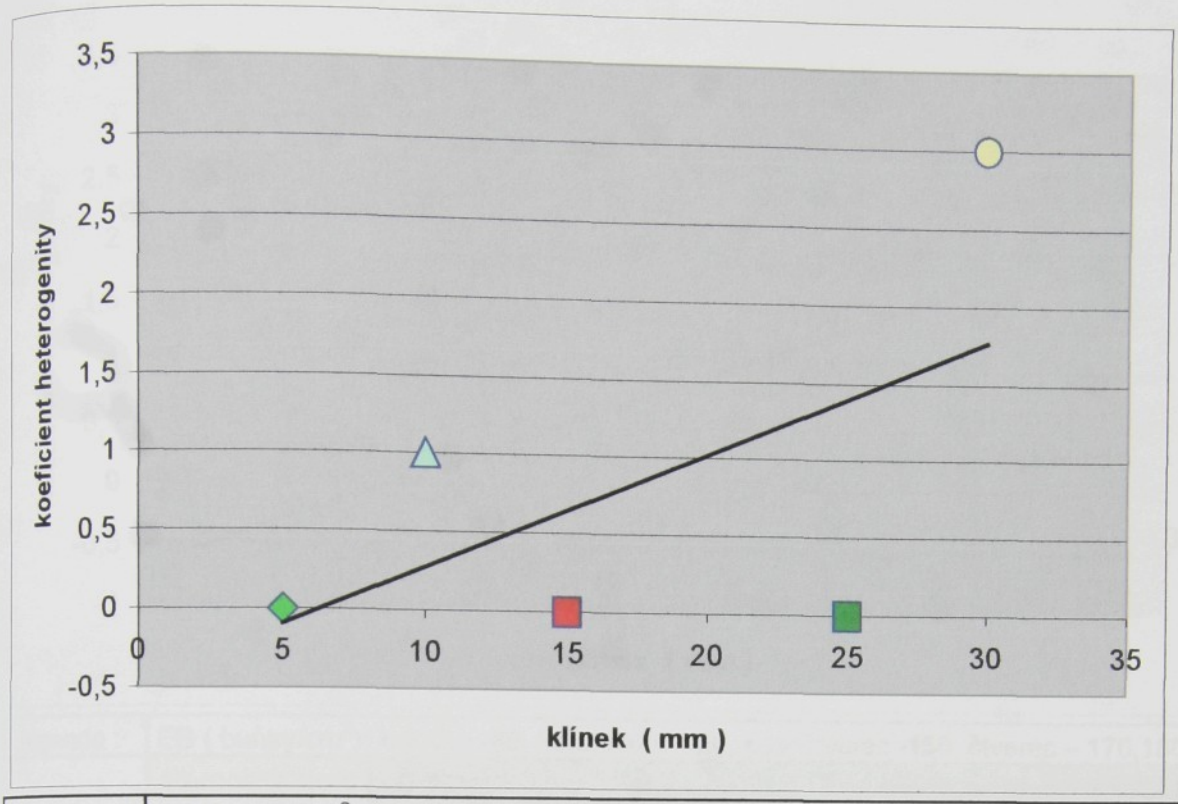


legenda :	1%modifikátoru	1%mod.+ 0,5%sek.očk.+CuSb	1%mod.+ 0,8%sek.očk.+CuSb
		1%mod.+ 1%sek.očk.+CuSb	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb

Obr. č. 133 Souvislost počtu eutektických buněk v ose zkušebních odlitků s počtem eutektických buněk v okolí vnitřních vad u sériových odlitků. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

BR 8) – souvislost sklonu litiny k zákalce s výskytem vnitř. vad v odlitcích z LČG

Zjištěná souvislost kopíruje rozložení i trend vlivu maximální licí teploty a je závislá i na úrovni grafitizačního očkování. Z obrázku č. 134 je patrné, že při vyšším sklonu litiny k zákalce je výskytem vnitřních vad v odlitcích pravděpodobnější.



legenda :	EB (buňky/cm^2): kolečko -80, trojúhelník -120, kosočtverec -150, čtverec – 170,180		
	1%modifikátoru	1%mod.+ 0,5%sek.očk.+CuSb	1%mod.+ 0,8%sek.očk.+CuSb
		1%mod.+ 1%sek.očk.+CuSb	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb

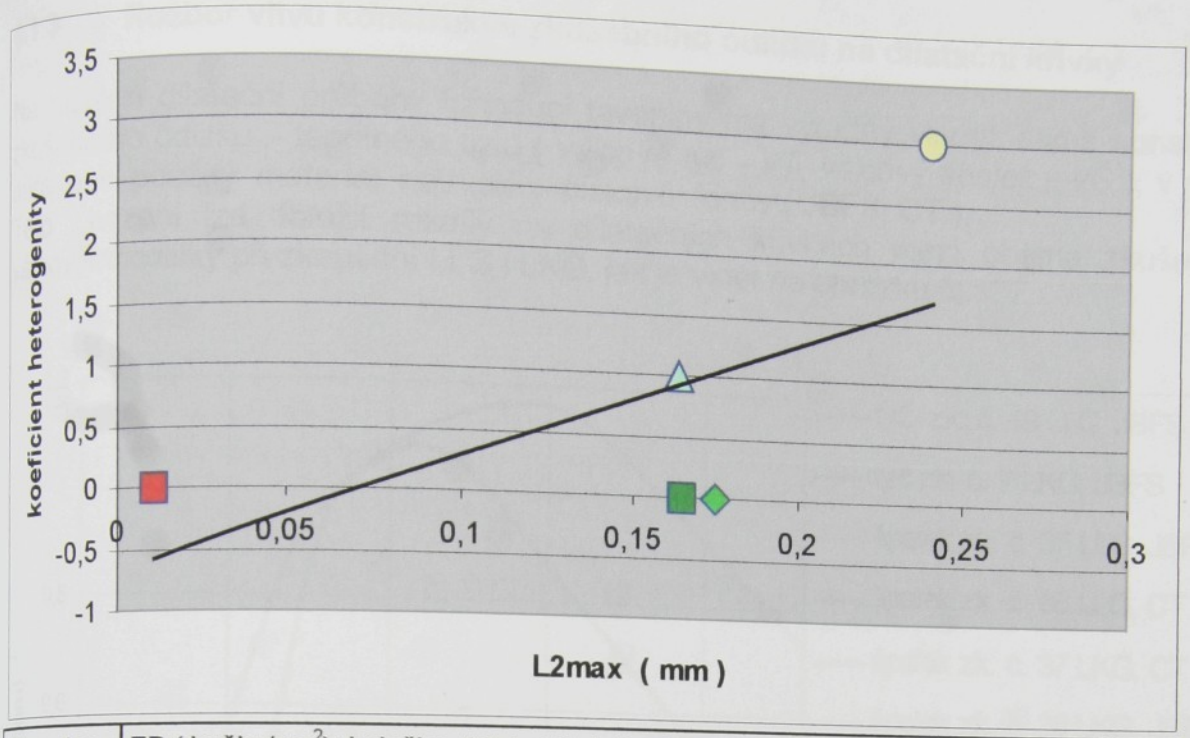
Obr. č. 134 Souvislost sklonu litiny k zákalce s výskytem vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

BR 9) – vliv maximální expanze L2max na výskyt vnitřních vad v odlitcích

Trend hledaného vlivu je na obrázku č.135. Na základě zjištěných souvislostí se dá konstatovat, že čím menší je celková maximální expanze L2max tím menší je výskyt vnitřních vad v odlitcích. Uvedené hodnoty L2max jsou relativně ovlivněny množstvím eutektických buněk v závislosti na sekundárních úpravách taveniny.

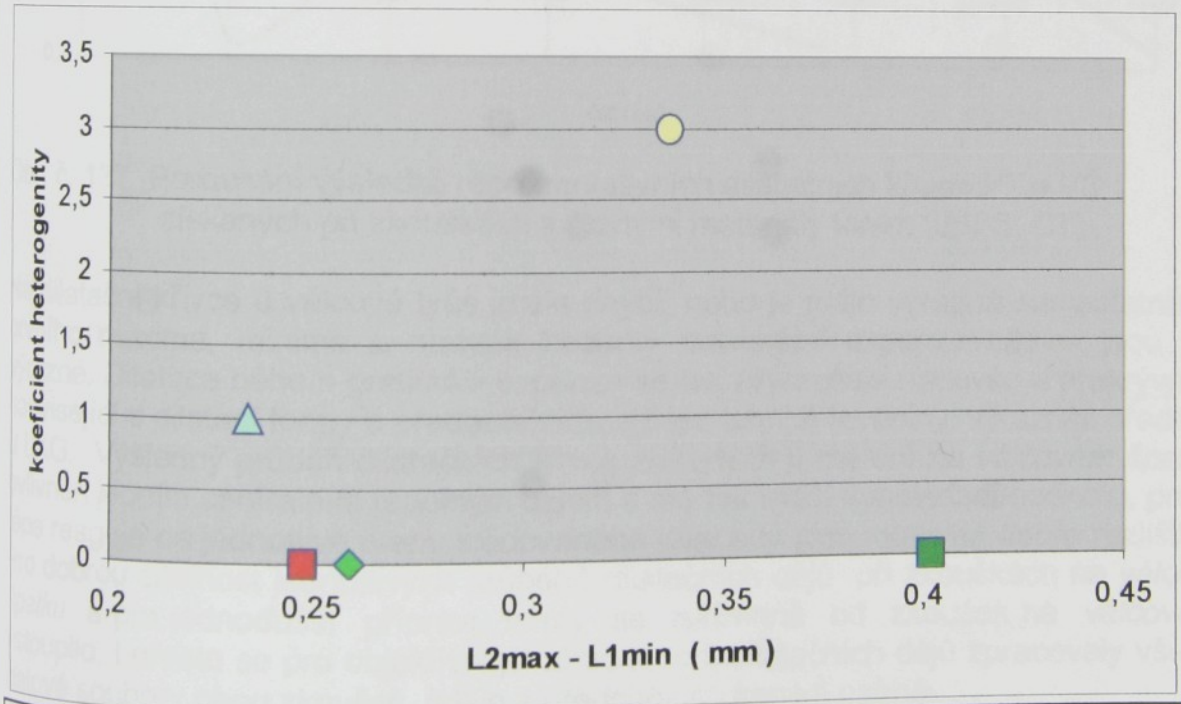
BR 10) – vliv grafitické expanze L2max-L1min na výskyt vnitřních vad v odlitcích

Na rozdíl od hodnot maximální expanze L2max netvoří hodnoty grafitické expanze L2max- L1min s koeficientem heterogenity takovou vazbu, aby se dal vytyčit trend relativně směrodatný pro všechny hodnoty v souboru. Určitou souvislost lze nalézt u hodnot grafiticky doočkovaných tavenin, kde se tento vliv projevuje částečně i v počtu zjištěných eutektických buněk, viz obrázek č. 136. Hodnota taveniny grafiticky neočkované zcela vybočuje z trendu předpokládaného u takto ošetřených tavenin. Výrazná grafitická expanze může být reakcí na vysokou licí teplotu, či na stav zárodků po modifikaci, který doposud nejsme schopni zhodnotit.
Z porovnání rozdílů výsledků obou expanzí vyplývá, že průběhy dilatačních dějů během tuhnutí LLG, LČG ovlivňují výskyt vnitřních vad v odlitcích a jsou vedle nepřehlédnutelné grafitické expanze také více závislé na ostatních procesech. Vedle vlivu dilatace formy se tu výrazněji prosazuje v některých případech i kladná dilatace během tuhnutí austenitu před grafitickou expanzí.



legenda :	EB (buňky/cm^2): kolečko -80, trojúhelník -120, kosočtverec -150, čtverec – 170,180		
	1%modifikátoru	1%mod.+ 0,5%sek.očk.+CuSb	1%mod.+ 0,8%sek.očk.+CuSb
		1%mod.+ 1%sek.očk.+CuSb	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb

Obr. č. 135 Vliv maximální expanze L2max na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

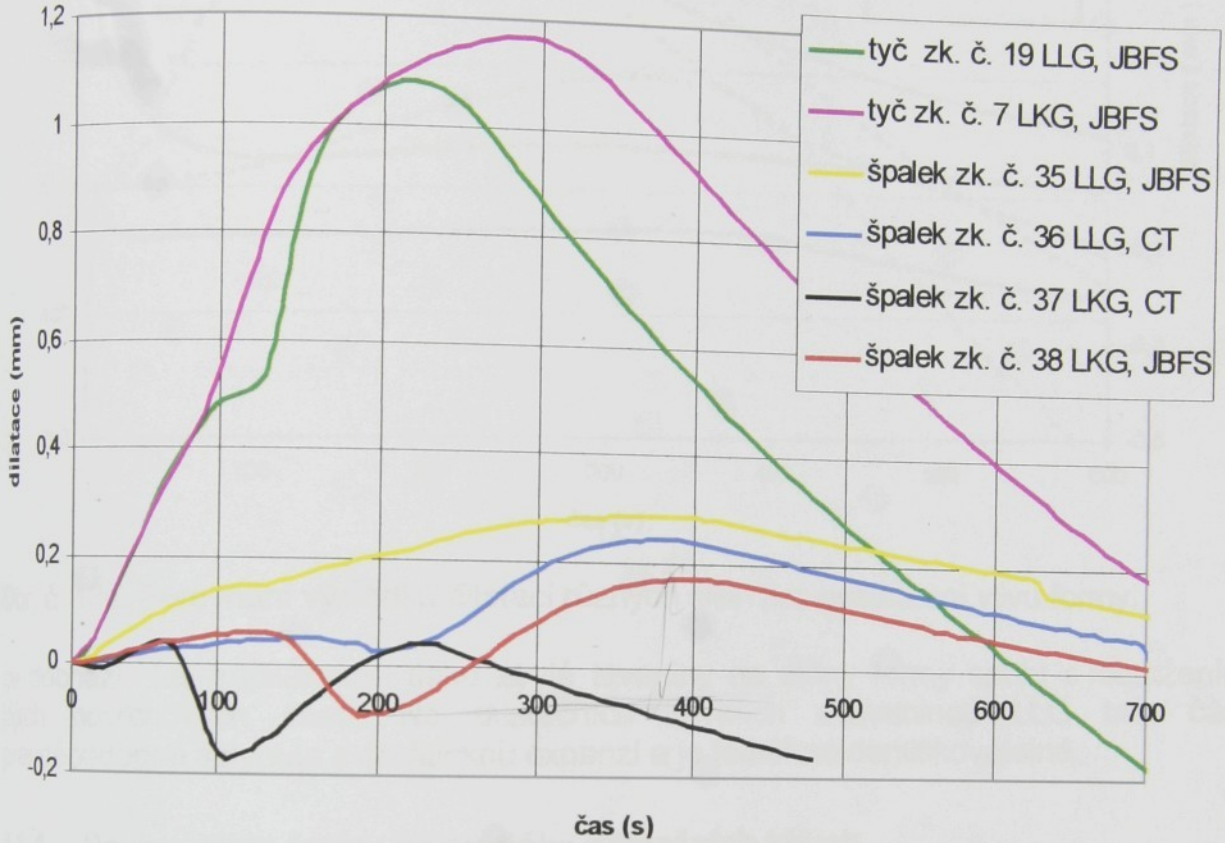


legenda :	EB (buňky/cm^2): kolečko -80, trojúhelník -120, kosočtverec -150, čtverec – 170,180		
	1%modifikátoru	1%mod.+ 0,5%sek.očk.+CuSb	1%mod.+ 0,8%sek.očk.+CuSb
		1%mod.+ 1%sek.očk.+CuSb	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb

Obr. č. 136 Vliv grafitické expanze L2max-L1min na výskyt vnitřních vad v odlitcích, který je nahrazen souhrnnou hodnotou - koeficientem heterogenity. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

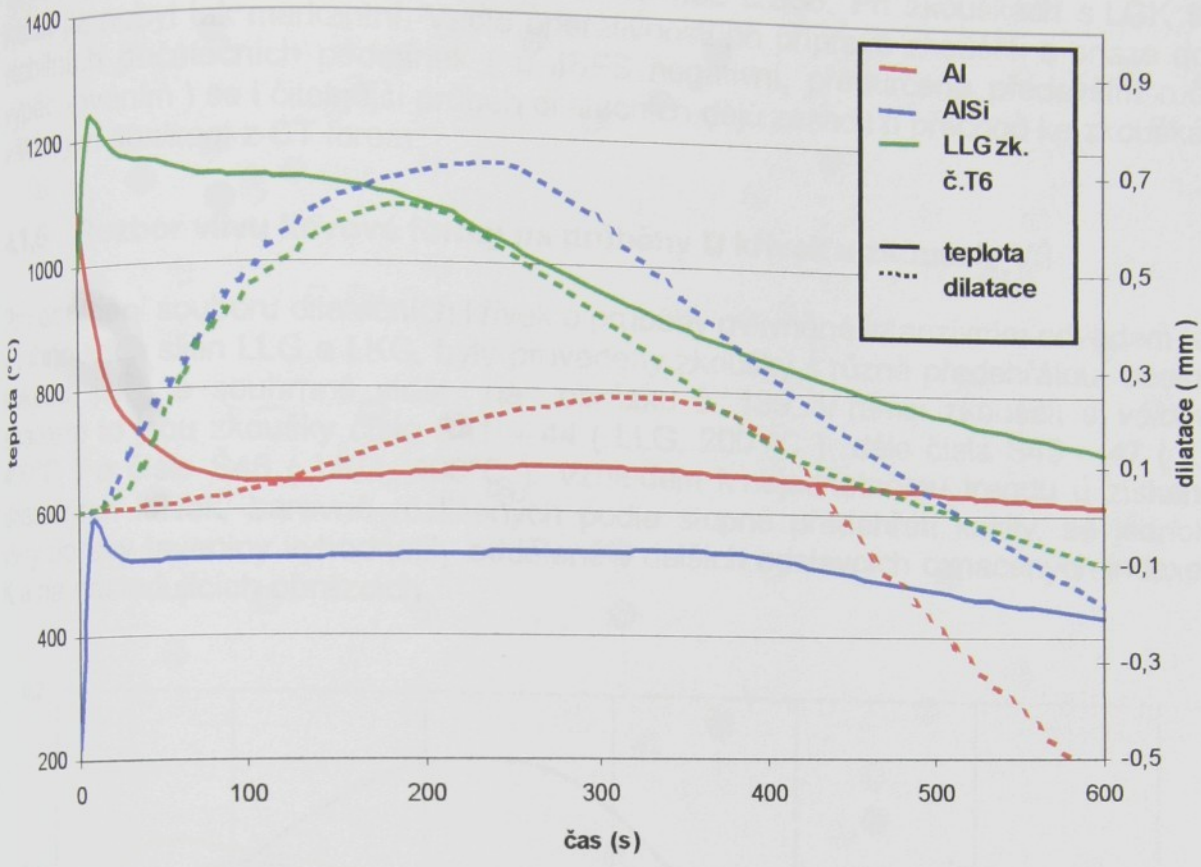
4.1.3 Rozbor vlivu konstrukce zkušebního odlitku na dilatační křivky

Na zjištěné dilatační průběhy tuhnoucí taveniny má výrazný vliv již sama konstrukce zkušebního odlitku – tepelného uzlu (*válcová tyč - VT*, *válcový špalek - VŠ*), v menší míře pak použitý materiál netrvalé - pískové formy (JBFS, CT).
Toto tvrzení lze doložit rozdíly na dilatačních křivkách mezi oběma zkušebními válcovými odlitky při zkoušení LLG i LKG, jak je vidět na obrázku č. 137.



Obr. č. 137 Porovnání výsledků reprezentativních dilatačních křivek *VT* a *VŠ* získaných při zkouškách s různými materiály forem (JBFS, CT).

Na dilatační křivce u válcové tyče zcela chybí, nebo je málo výrazná samostatná fáze prvního maxima, minima a naopak hodnoty maximální expanze L2max jsou velmi výrazné. Dilatace během grafitické expanze se tak zvýrazňuje nadevše a překrývá děje související s dilatací formy a předeutektickou části tuhnutí taveniny, výrazněji především u LKG. Výsledný průběh dilatačních křivek získaných u měření na *válcovém špalku* je ovlivněn jedním centrálním tepelným uzlem a má tak vyšší vypovídací hodnotu, protože lépe reaguje na jednotlivé etapy sledovaného děje a ty jsou relativně dobře rozlišitelné. Pro dobrou čitelnost jednotlivých průběhů dilatačních dějů při zkouškách na *válcovém špalku* a pro jednodušší přípravu formy se následně od zkoušek na *válcové tyči* ustoupilo. I přesto se pro objektivnější zhodnocení dilatačních dějů zpracovaly všechny datové soubory obou zkoušek, jak je z předchozích kapitol patrné.
Změřený průběh prvního maxima L1max pravděpodobně z větší části reaguje na dilataci povrchových vrstev formy po kontaktu s tekutým kovem. Jako důkaz tohoto tvrzení jsou na obrázku č. 138 porovnané dilatační křivky materálů Al, AlSi a LLG, provedené na *válcové tyči* bez dalšího vyhodnocení. Čisté Al ani slitina AlSi během tuhnutí a chladnutí neprodělává žádnou expanzní změnu a přesto je na uvedené křivce po celou dobu krystalizace nezanedbatelný růst sledovaného rozměru. Spolu s řadou autorů (GEDEONOVÁ, DÚL, ...) se shoduji v názoru, že je pravděpodobné,



Obr. č. 138 Porovnání výsledků dilatací různých slitin pro posouzení vlivu formy.

že dochází ke kapilárnímu tlaku zbylé taveniny na stěny formy spolu s roztažením jejich povrchových částí. Na dilatačních křivkách s taveninou LLG tato část pravděpodobně splynula s grafitickou expanzí a je téměř neidentifikovatelná.

4.1.4 Rozbor vlivu formy na průběhy dilatačních křivek

Materiál formy je jedním z rozhodujících činitelů v rámci vlivů určujících výslednou homogenitu odlitků, a to obecně. Ve slévárenství se zdůrazňují především následující vlivy :

a) vliv dilatace formy – který je charakterizován dilatací materiálu formy po ohřátí jejich povrchových vrstev odlévanou taveninou.

b) vliv tuhosti formy – který je charakterizován jako odpor materiálu formy proti dilataci odlitku především při expanzi grafitu během tuhnutí.

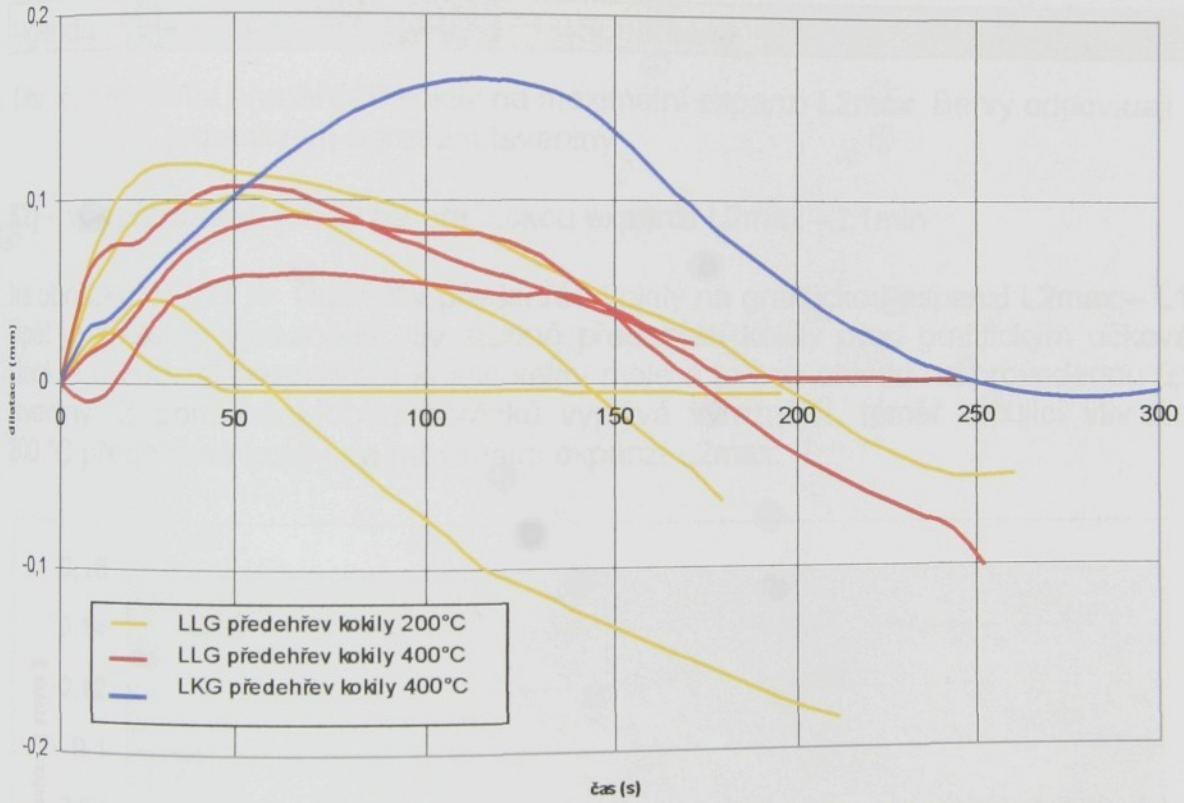
c) vliv odvodu tepla stěnou formy - který je charakterizován jako schopnost materiálu formy odvádět teplo z tuhnoucího a chladnoucího odlitku i po vzniku mezery mezi odlitkem a formou.

Předpokládáme, že i mimo expanzi grafitu kopíruje povrch formy zhruba povrch odlitku a to do doby porušení formy. U JBFS, CT ke vzniku dokonalé mezery nedojde z titulu penetrace kovu mezi zrníčka písku tvořící kostru pískové formy a jejího mnohonásobného porušení (objemové porušení) pojiva v přilehlých povrchových vrstvách formy. Porovnání základních dvou formovacích materiálů používaných při zkoušce na *válcovém špalku* je vidět na již citovaném obrázku č. 137. Nejvýraznější rozdíly jsou při zkouškách LLG, zkoušky č. Š35 (JBFS, žlutá barva) a č. Š36 (CT, modrá barva). Průběh dilatace u zkoušky č. Š35 obsahuje nevýrazné, pouze vlivem konstrukce zkušebního odlitku patrné první maximum, na rozdíl od následujícího,

výrazně čitelného průběhu, zkoušky s CT formou č.Š36. Při zkouškách s LGK tento rozdíl již nebyl tak markantní. Vedle operativnosti při přípravě zkoušek a snaze docílit stabilních počátečních podmínek (u JBFS negativní, předurčeno především ručním vypěchováním) se i čitelnější průběh dilatačních dějů zasadil o přechod ke zkouškám s *válcovým špalkem* z CT forem.

4.1.5 Rozbor vlivu kovové formy na průběhy D křivek u zkoušek VŠ

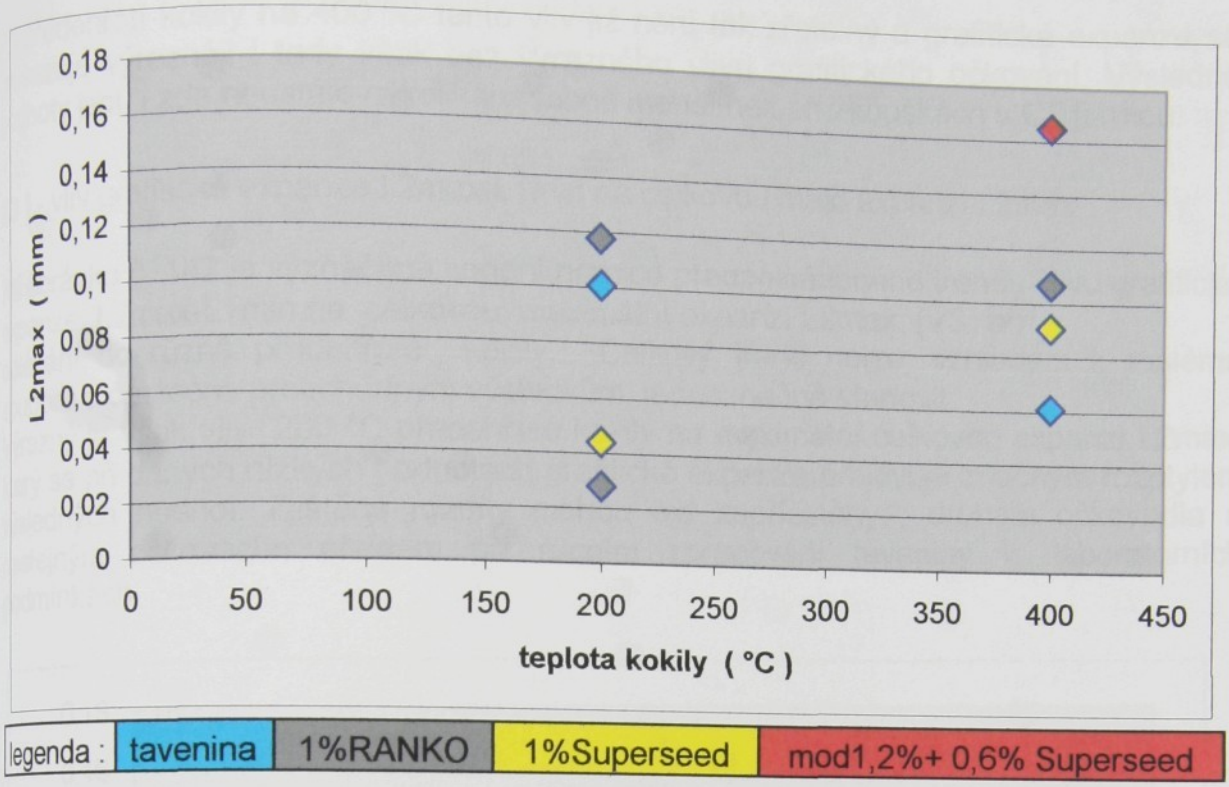
Pro doplnění souboru dilatačních křivek o průběhy ovlivněné intenzivním odvodem tepla z tuhnoucích slitin LLG a LKG, byly provedeny zkoušky s různě předehřátou ocelovou kokilou, jak je souhrnně vidět na obrázku č. 139. V rámci zkoušek s *válcovým špalkem* to jsou zkoušky číslo Š41 – 44 (LLG, 200 °C) dále čísla Š45 – 47 (LLG, 400°C) a číslo Š48 (LKG, 400°C). Vzhledem k nejednotnému trendu u získaných dilatačních křivek, barevně rozlišených podle stupně předehřátí kokily, se jednotlivé vlivy úpravy taveniny vyhodnotily odděleně v dalších odstavcích označených indexem - K a na následujících obrázcích.



Obr. č. 139 Průběh dilatačních křivek tuhnoucích slitin LLG a LKG při zkouškách (VŠ) s předehřátou ocelovou kokilou. Stupeň předehřátí viz legenda.

K1) - vliv předehřátí kokily na maximální expanzi L2max

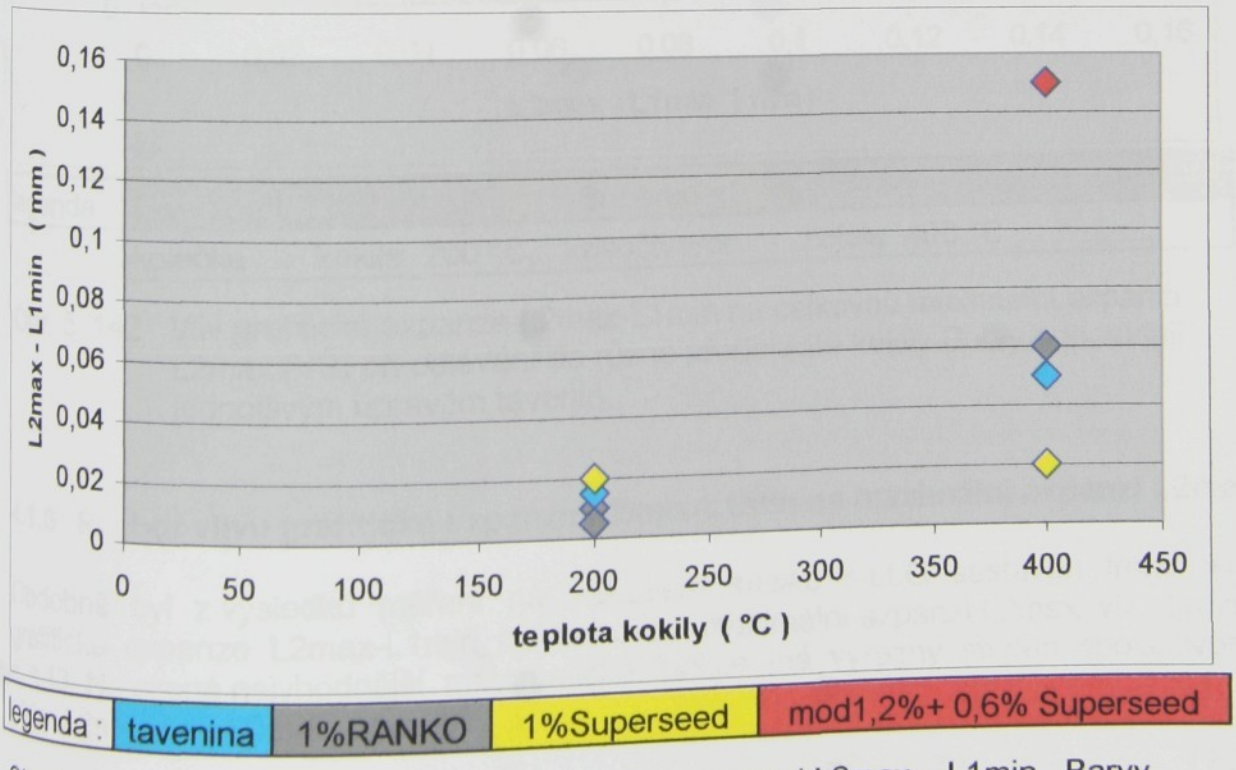
Zjištěný vliv je na obrázku č. 140. Výsledné hodnoty ze souboru předehřáté kokily na 200 °C mají větší rozptyl, než hodnoty ze souboru předehřáté na 400 °C. Nejnižší hodnoty ze souboru výše předehřáté kokily jsou téměř dvojnásobné, jako tytéž hodnoty ze souboru prvního. Uplatňuje se zde pravděpodobně především vliv menšího odvodu tepla z tuhnoucí taveniny. I tak jsou získané hodnoty téměř 5-ti násobně nižší, než nejvyšší výsledky s CT formou. Z obrázku je patrné, že i přes výrazné předehřátí kokily (max. 400 °C) má na maximální expanzi L2max výraznější vliv odvod tepla z taveniny než grafitické očkování. Maximální expanze modifikované a grafiticky očkované taveniny (LKG) je téměř dvojnásobná oproti hodnotám LLG.



Obr. č. 140 Vliv předehřátí kokily na maximální expanzi L2max. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

K2) - vliv předehřátí kokily na grafitickou expanzi L2max – L1min

Na obrázku č. 141 je vidět vliv předehřátí kokily na grafitickou expanzi L2max – L1min. Opět je zřetelný výraznější vliv stupně předehřátí kokily před grafitickým očkováním, které je u 200 °C předehřáté kokily velmi malé a to bez ohledu na provedenou úpravu taveniny. Z porovnání obou obrázků vyplývá výraznější, téměř určující vliv dilatace 200 °C předehřáté kokily na maximální expanzi L2max.

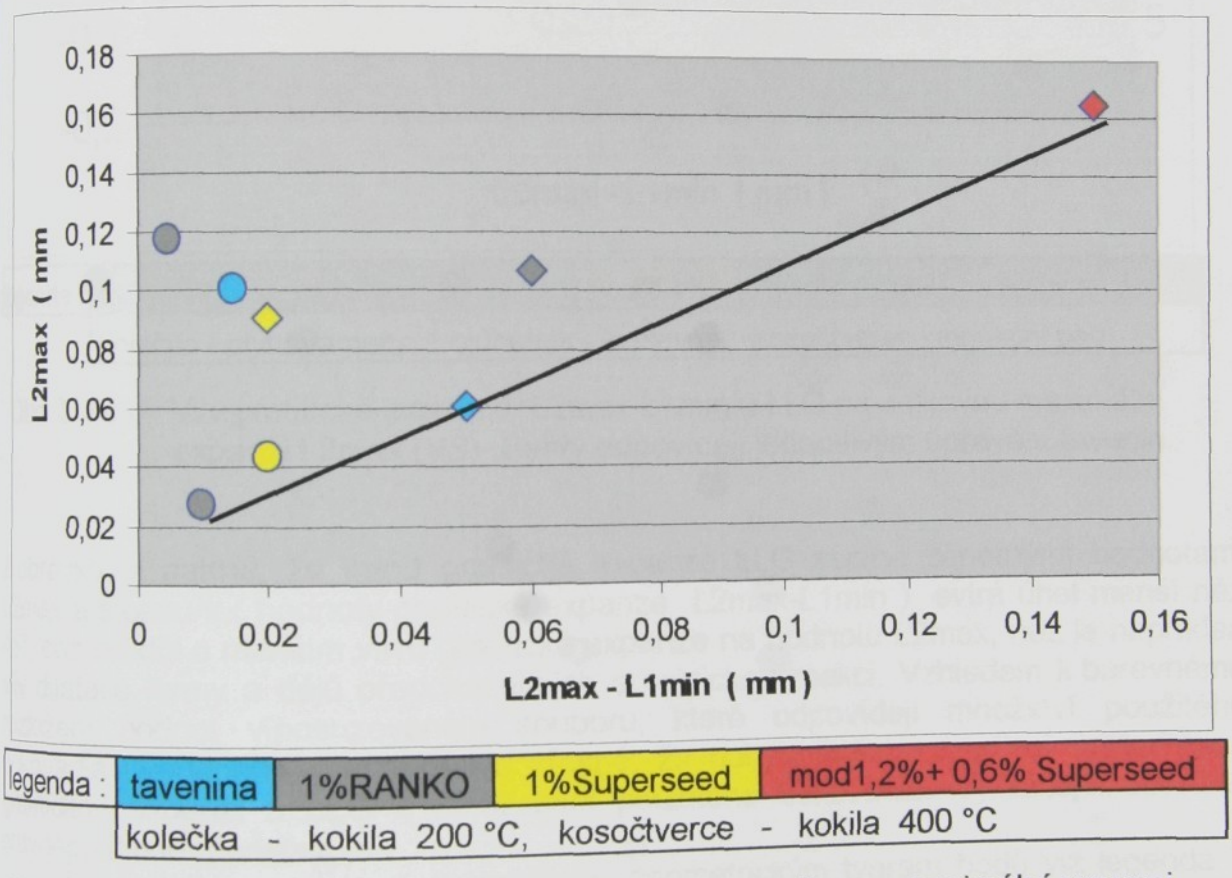


Obr. č. 141 Vliv předehřátí kokily na grafitickou expanzi L2max – L1min. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

Při předehřátí kokily na 400 °C tento vliv již není tak zřetelný a grafitická expanze se prosazuje výrazněji i tady však bez výrazného vlivu grafitického očkování. Výsledné hodnoty jsou i zde neustále několikanásobně menší než při zkouškách s CT formou.

K3) - vliv grafitické expanze L2max-L1min na celkovou max. expanzi L2max

Na obrázku č. 142 je vyznačená spodní hranice předpokládaného trendu vlivu grafitické expanze L2max-L1min na celkovou maximální expanzi L2max (VŠ) při odlévání do různě předehřáté kokily. Celkový trend nelze, vzhledem k malému souboru a částečně protichůdným výsledkům, jednoznačně stanovit.
Výrazný je však vliv 200 °C předehřáté kokily na maximální celkovou expanzi L2max, který se při daných nízkých hodnotách grafitické expanze projevuje značným rozptylem výsledných hodnot. Zjištěné rozdíly mohou být zapříčiněny : druhem očkovadla a nestejným očkovacím efektem při ručním zpracování taveniny v laboratorních podmínkách.

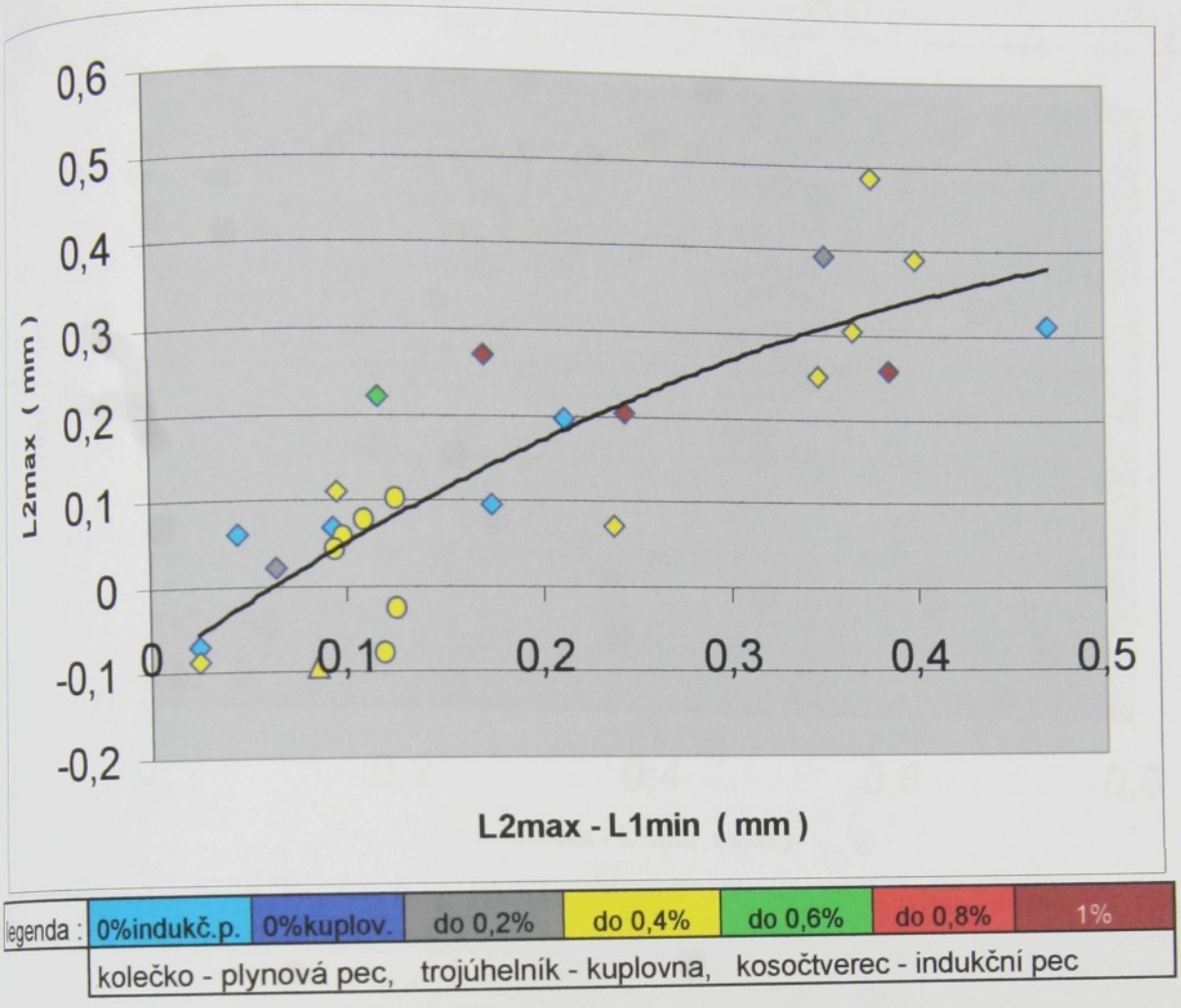


Obr. č. 142 Vliv grafitické expanze L2max-L1min na celkovou maximální expanzi L2max (VŠ) při odlévání do různě předehřáté kokily.Barvy odpovídají jednotlivým úpravám tavenin.

4.1.6 Rozbor vlivu grafitické expanze L2max-L1min na maximální expanzi L2max

Obdobně byl z výsledků měření na *válcovém špalku* s LLG sestaven trend vlivu grafitické expanze L2max-L1min na celkovou maximální expanzi L2max, viz obrázek č. 143. Nalezená nejvhodnější matematická funkce má výrazný stupeň spolehlivosti, (Y - L2max, x - L2max- L1min) :

$$Y = -1,1626.x^2 + 1,5542.x - 0,0939 \qquad R^2 = 0,73 \qquad (85)$$



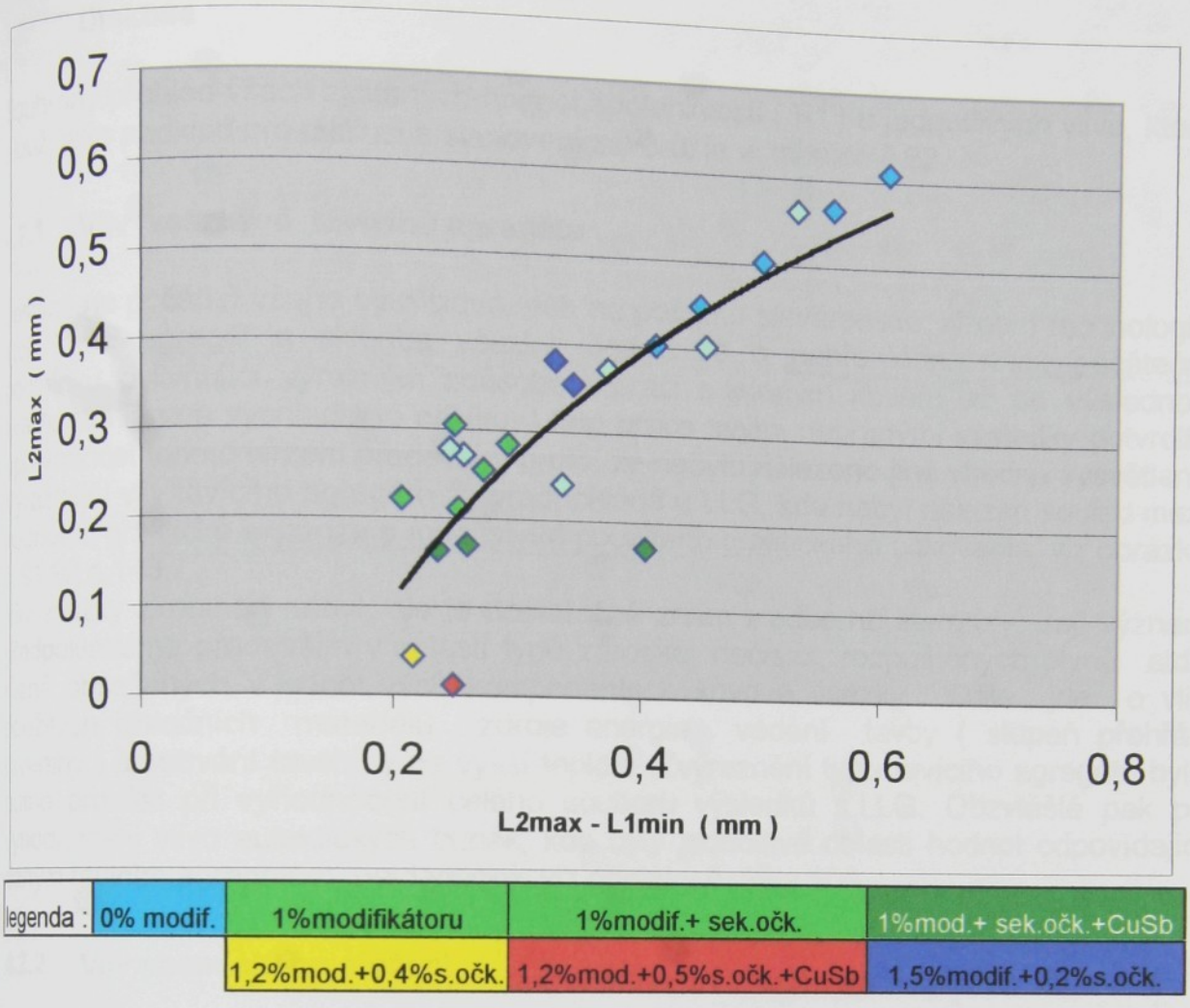
Obr. č. 143 Vliv grafitické expanze L2max-L1min u LLG na celkovou maximální expanzi L2max (VŠ). Barvy odpovídají jednotlivým úpravám tavenin.

Z obrázku je patrné, že trend grafitické expanze LLG začíná zápornými hodnotami L2max a s osou x (hodnoty grafitické expanze L2max-L1min) svírá úhel menší něž 45°, což svědčí o menším vlivu grafitické expanze na hodnotu L2max, než je například vliv dilatace formy a dějů předcházejících eutektickou reakci. Vzhledem k barevnému rozložení hodnot v posuzovaném souboru, které odpovídají množství použitého očkovadla uvedeného v legendě, je zřejmé, že nebyla nalezena přímá vazba mezi grafitickou expanzí u LLG a množstvím použitého očkovadla. Výraznější vliv zde pravděpodobně představuje :

- typ tavícího agregátu (zvýrazněno geometrickým tvarem bodů viz legenda), kdy se žluté body označující stejnou úroveň očkování nacházejí po celé délce proložené křivky
- režim tavícího procesu (stupeň přehřátí, doba setrvání taveniny na vyšší teplotě)
- a v neposlední řadě i vsázkové materiály (zejména % ocelového šrotu)

Při vyhodnocení vlivu grafitické expanze L2max-L1min u LKG, LČG na celkovou maximální expanzi L2max, viz obrázek č. 144, byla nalezena nejvhodnější matematická funkce se stejně významnou hodnotou stupně spolehlivosti, jako v případě zkoušek s LLG, (Y - L2max, x - L2max- L1min) :

$$Y = 0{,}4109 \ln x + 0{,}7683 \qquad R^2 = 0{,}73 \qquad (86)$$



Obr. č. 144 Vliv grafitické expanze L2max-L1min u LKG,LČG na celkovou maximální expanzi L2max (VŠ). Barvy odpovídají jednotlivým úpravám tavenin.

Na rozdíl od hodnot souboru zkoušek s LLG jsou výsledky s LČG a LKG v téměř stejném poměru k oběma veličinám na ose x (hodnoty grafitické expanze L2max-L1min) i y (hodnoty celkové maximální expanze L2max). Z obrázku je patrné, že vliv grafitické expanze je mírně výraznější, nebo stejný jako vliv dilatace formy s předeutektickými změnami na celkovou maximální expanzi L2max. Vyznačený trend nemá svůj počátek při nulové hodnotě L2max, ale při kladné hodnotě grafitické expanze což podporuje význam jejího vlivu. Z obrázku je podle barevného rozlišení jednotlivých hodnot patrný i zásadní vliv množství použitého grafitizačního očkovadla na vyhodnocovanou grafitickou expanzi, následně na celkovou maximální expanzi L2max, ale i na homogenitu odlitků.

4.2 Diskuse

Souhrnný přehled všech zjištěných hodnot spolehlivosti (R^2) u jednotlivých vlivů, který slouží jako podklad pro diskusi a stanovení závěrů, je v tabulce č 22.

4.2.1 Vliv vsázky a tavícího agregátu

Jestliže na počátku všeho bylo slovo, pak na počátku slévárenské výrobní technologie stojí tavící agregát a skladba vsázky. Jedná se o nepřehlédnutelnou počáteční podmínku ovlivňující výrazným způsobem práci s tekutým kovem až po výslednou kvalitu ztuhlého a vychladlého odlitku. I tato práce svými nepřímými výsledky potvrdila oprávněnost tohoto tvrzení především proto, že nebylo nalezeno jiné vhodné vysvětlení. Výraznější vliv tavícího agregátu se předpokládá u LLG, kde nebyl nalezen soulad mezi hodnotou grafitické expanze a množstvím použitého grafitického očkovadla, viz obrázky č. 91,92 a 143.

Vliv vsázky zkoumán nebyl, ale je dostatečně znám z odborné literatury. Její význam předpokládáme především v oblasti typů zárodků, nečistot, rozpuštěných plynů atd., různě obsažených v jednotlivých komponentech kovové vsázky. Dále jde o vliv použitých izolačních materiálů, zdroje energie, vedení tavby (stupeň přehřátí taveniny) a setrvání taveniny na vyšší teplotě. Zvýraznění typu tavícího agregátu bylo nutné provést při vyhodnocení celého souboru výsledků s LLG. Obzvláště pak při vyhodnocení vlivu eutektických buněk, kde byly jednotlivé oblasti hodnot odpovídající daným tavícím agregátům neidentické, viz obrázky č. 99 a 100.

4.2.2 Vliv chemického složení

Uvedený vliv byl posuzován pouze u zkušebních odlitků (VT, VŠ). V rámci výroby sériových odlitků byly zkoušky zaměřeny především na vliv sekundární úpravy taveniny a chemické složení se pohybovalo v hranicích předepsané normy. Zjištěné výsledky dovolují konstatovat, že jak u LLG tak u LČG,LKG nemá chemické složení významný vliv na průběh dilatačních dějů během tuhnutí upravených i neupravených tavenin. Na obrázcích č.97 (LLG) a 110 (LČG,LKG) je sice patrná horní hranice naměřených expanzních hodnot, jejich celkové rozložení však nedovoluje mluvit víc jak o trendu.

4.2.3 Vliv licí teploty

Velmi zajímavý je nalezený protichůdný výsledek hodnocení vlivu licí teploty mezi LLG a LČG,LKG. Jestliže u modifikovaných litin je vliv vysoké licí teploty na vznik vad a trendově i na dilatační maximum jednoznačně negativní - viz obrázky č. 119 a 129, pak u šedých litin je tomu naopak - viz obrázky č. 93 a 120. Nalezený rozdíl bude mít příčinu pravděpodobně v odlišném průběhu tuhnutí obou typů litin.

4.2.4 Vliv sekundárního zpracování taveniny

Nejsledovanějším vlivem na průběh dilatačních křivek společně s výskytem vnitřních vad v odlitcích, a to jak u zkušebních, tak především u sériových odlitků, byl vliv sekundárních úprav taveniny. Celkově byly ověřovány tři typy úprav : grafitické očkování,legování a modifikace. Jestliže má modifikace nejvýraznější vliv na změnu průběhu tuhnutí litiny (nejvýraznější a nejvyšší dosažená maxima z celého souboru měření), pak grafitické očkování má zásadní vliv na změnu dilatačních dějů v souladu

Tabulka č.22 Souhrnný přehled hodnot spolehlivosti (R^2) u jednotlivých posuzovaných vlivů.

zkoušky	posuzovaný vliv	obr.č.	hodnota spolehlivosti R^2
VT LLG (AT)	1. Množství a druh očkovadla na L2max	69	0,31
	2. Licí teplota na L2max	70	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	3. Kvalita grafitu na L2max	71	0,44
	4. Chemické složení na L2max	72	0,19
	5. Délka eutektické reakce na L2max	73	0,47
	6. Počet eutektických buněk na L2max	74	0,36
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	75	0,52
	- počet eutektic. buněk na rychlost stoupání D křivek	76	0,49
	- množství očkovadla na počet eutektických buněk	77	0,51
	- množství očkovadla na rychlost stoupání D křivek	78	0,34
	8. Množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce	79	0,4
VT LKG (BT)	1. Množství modifikátoru na L2max	81	malé množství hodnot
	2. Licí teplota na L2max	82	malé množství hodnot
	3. Kvalita grafitu na L2max	83	malé množství hodnot
	4. Chemické složení na L2max	84	malé množství hodnot
	5. Délka eutektické reakce na L2max	85	malé množství hodnot
	6. Počet eutektických buněk na L2max	86	malé množství hodnot
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	87	malé množství hodnot
	8. Množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce	88	malé množství hodnot
VŠ LLG (AŠ)	1. Množství a druh očkovadla na L2max	91	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	množství a druh očkovadla na graf. exp. L2max-L1min	92	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	2. Licí teplota na L2max	93	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	3. Kvalita grafitu na L2max	94	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	4. Chemické složení na L2max	95	0,15
	chemického složení na grafitic. expanzi L2max-L1min	96	0,36
	5. Délka eutektické reakce na L2max	97	0,4
	délka eutekt. reakce na grafitic. expanzi L2max-L1min	98	0,14
	6. Počet eutektických buněk na L2max	99	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	počet eut. buněk na grafitickou expanzi L2max-L1min	100	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	101	0,38
	rychlost stoupání D křivek na graf. exp. L2max-L1min	102	0,84
	8. Množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce	104	0,57
VŠ LČG LKG (BŠ)	1. Množství modifikátoru a očkovadla na L2max	107	0,44
	množství modifikátoru a očkovadla na grafit. expanzi	108	0,51
	2. Licí teplota na L2max	109	0,1
	3. Kvalita grafitu na L2max	/	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	kvalita grafitu na grafitickou expanzi L2max	/	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	4. Chemické složení na L2max	110	0,2
	Mg na L2max	111	0,55
	Mg na grafitickou expanzi L2max-L1min	112	0,55
	5. Délka eutektické reakce na L2max	113	0,48
	délka eut. reakce na grafitic. expanzi L2max-L1min	114	0,38
	6. Počet eutektických buněk na L2max	115	0,92
	počet eut. buněk na grafitic. expanzi L2max-L1min	116	0,38
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	117	0,55
	rychlost stoupání D křivek na graf. exp. L2max-L1min	118	0,75
	8. Množství eutektic. buněk na sklon litiny k zákalce	/	0,03

zkoušky	posuzovaný vliv	obr.č.	hodnota spolehlivosti R^2
kokila (K)	1. Předehřátí kokily na L2max	140	malé množství hodnot
	2. Předehřátí kokily na grafitickou exp. L2max-L1min	141	malé množství hodnot
	3. Grafitická expanze na celkovou expanzi L2max	142	malé množství hodnot
VŠ-LLG	Grafitická exp. L2max-L1min na celkovou exp. L2max	143	0,73
VŠ-LKG	Grafitická exp. L2max-L1min na celkovou exp. L2max	144	0,73
VŠ-LLG	množství aktivního kyslíku na celkovou exp. L2max	145	malé množství hodnot
VŠ-LKG	množství aktivního kyslíku na graf. exp. L2max-L1min	146	malé množství hodnot

zkoušky	posuzovaný vliv na vady u sériových odlitků	obr.č.	hodnota spolehlivosti R^2
brzdový buben LLG (AB)	1. Množství a druh očkovadla	119	0,46
	2. Licí teplota	120	0,15
	3. Kvalita grafitu	121	0,3
	4. Chemické složení	/	nebylo posuzováno
	5. Délka eutektické reakce	122	0,63
	6. Počet eutektických buněk	123	0,4
	souvislost počtu EB mezi zkuš. a sériovými odlitky	124	0,7
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	/	0,02
	8. Množství eutekt. buněk na sklon litiny k zákalce	125	0,2
	9. Maximální expanze L2max	126	0,04
	10. Grafitická expanze L2max-L1min	127	0,06
řošt LČG (BR)	1. Množství a druh očkovadla	128	malé množství hodnot
	2. Licí teplota	129	malé množství hodnot
	3. Kvalita grafitu (% kuliček)	130	malé množství hodnot
	4. Chemické složení (Mg)	/	malé množství hodnot
	5. Délka eutektické reakce	131	malé množství hodnot
	6. Počet eutektických buněk	132	malé množství hodnot
	souvislost počtu EB mezi zkuš. a sériovými odlitky	133	malé množství hodnot (0,91)
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	/	malé množství hodnot
	8. Množství eutekt. buněk na sklon litiny k zákalce	134	malé množství hodnot
	9. Maximální expanze L2max	135	malé množství hodnot
	10. Grafitická expanze L2max-L1min	136	malé množství hodnot

Legenda k rozlišení barev :

zanedbatelná spolehlivost $R^2 = 0 - 0,39$

nezanedbatelná spolehlivost (trend) $R^2 = 0,4 - 0,69$

výrazná spolehlivost (vliv) $R^2 = 0,7 - 1$

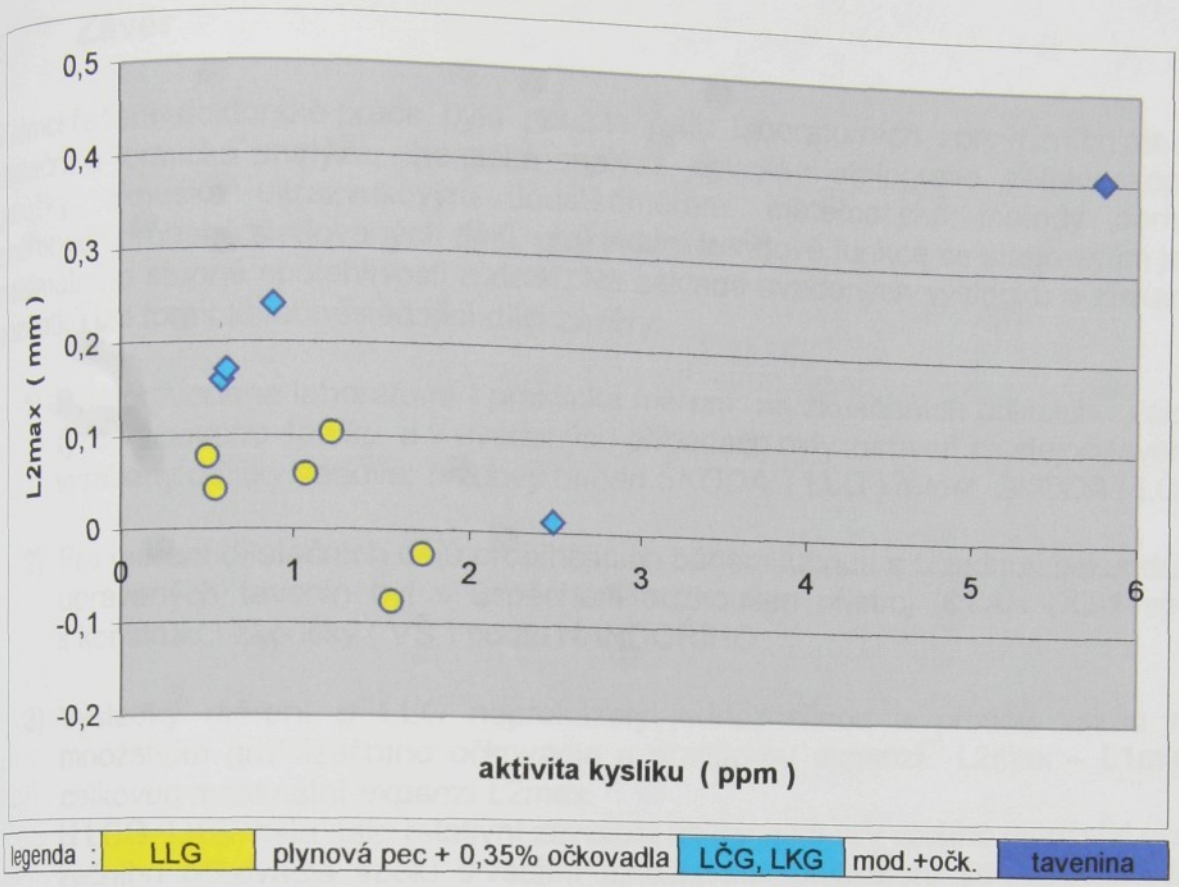
s výskytem uvedených vad. Rozdíly v dilatacích i ve kvalitě odlitků vlivem legování taveniny jsou zajímavé pouze při úpravě jinak neupravované taveniny, což

pravděpodobně souvisí s vnášením cizích dalších zárodků. Z obrázků č. 143 (LLG) a 144 (LČG,LKG) je patrný vliv očkování na jednotlivé dilatační děje. Relativním překvapením je nevýrazný vliv množství grafitického očkovadla na grafitickou expanzi u LLG, která je relativně v rozporu s hodnocením výsledků kvality sériových odlitků na vnitřní vady. Je však zcela v souladu s obecně známou představou , kdy vlivem větší grafitické expanze dojde k objemovému roztažení tuhnoucího odlitku, tím k zvětšení dutiny pískové formy a vlivem postupující krystalizační fronty odlitek sám nedokáže zásobit vlastní tepelné uzly za vzniku ředin a staženin.
Zcela odlišná situace byla vyhodnocena u sériových odlitků z LČG,LKG, kde se grafitické očkování projevilo jednoznačně kladnými výsledky a velikost eutektické dilatace byla na této úpravě taveniny téměř přímo závislá. Čím větší množství grafitizačního očkovadla při větším množství modifikátoru bylo použito, tím menší grafitickou expanzi upravená tavenina vykázala. Zjištěnou závislost lze vysvětlit pouze průběhem tuhnutí takto upravených tavenin.

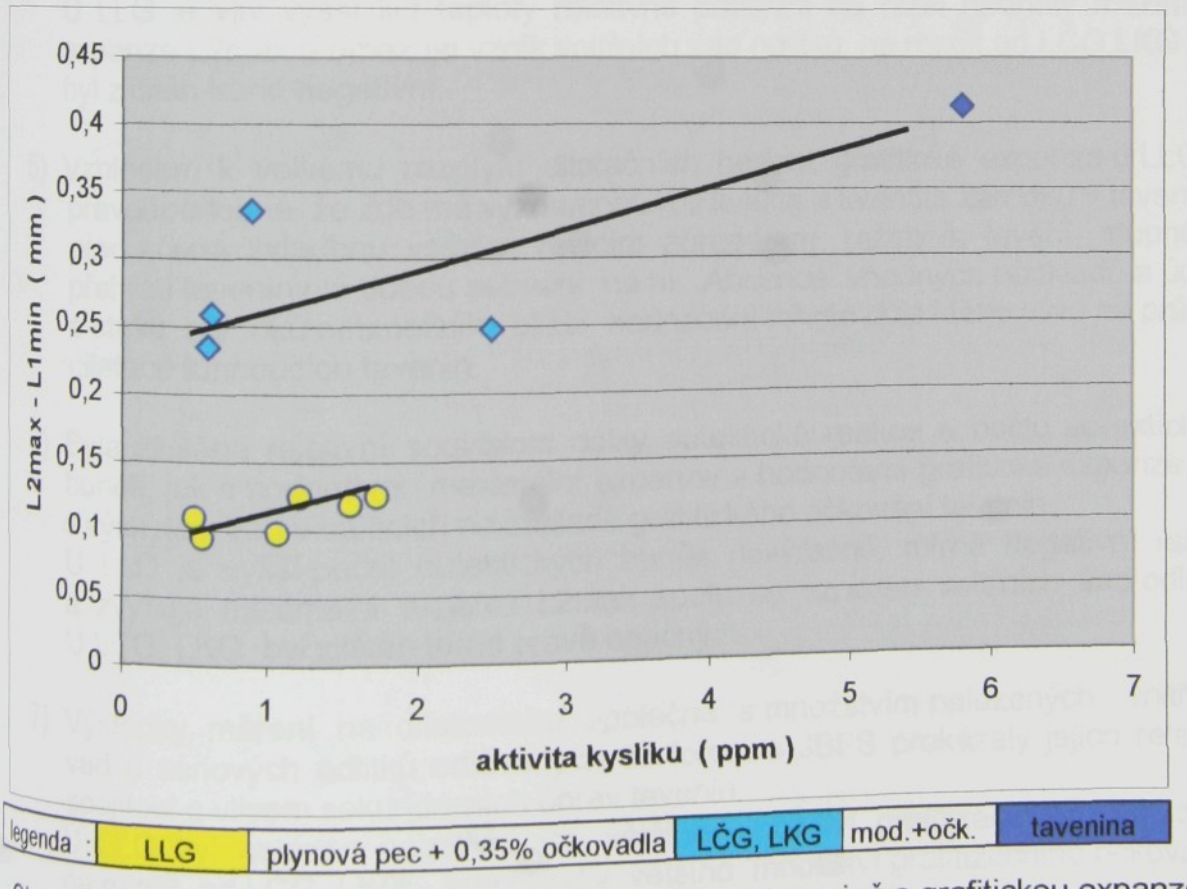
4.2.5 Vyhodnocení souvislosti množství aktivního kyslíku v tavenině s maximální a eutektickou dilatací během tuhnutí grafitických litin

Při několika zkouškách byla po úpravě taveniny měřena hodnota aktivního kyslíku. Zjištěné hodnoty u LLG a u LČG, LKG jsou v tabulce č. 20 v kapitole 3.3.6. Na obrázcích č. 145 a 146 jsou znázorněny souvislosti mezi maximální expanzí L2max, eutektickou expanzí L2max-L1min a naměřenými hodnotami aktivního kyslíku u uvedených zkoušek. Vzhledem k malému souboru a rozptylu hodnot u obou typů litin se při vyhodnocení maximální expanze L2max nestanovoval ani předpokládaný trend souvislosti.
Na obrázku č. 146, který znázorňuje souvislost s eutektickou expanzí, se dá u obou litin určitý trend předpokládat a proto je také znázorněn. Z obou obrázků jednoznačně vyplývá rozdílná úroveň změřených hodnot jednotlivých expanzí při relativně podobných hodnotách aktivního kyslíku v taveninách v návaznosti na typ sekundární úpravy a dá se předpokládat i podle druhu tavícího agregátu. Stoupající trend u LČG, LKG je podobný vlivu množství použitého modifikátoru a grafitizačního očkovadla, se kterým pravděpodobně přímo souvisí a odpovídá dezoxidační teorii. Obdobný trend s aplikací stejné dezoxidační teorie byl nalezen u LLG tavenin vytavených z plynové pece. Směrnice tohoto trendu při hodnocení vlivu množství použitého očkovadla na velikost eutektické expanze je spíše opačná.

Pro další výzkum dilatačních dějů během tuhnutí grafitických litin by bylo zajímavé vysledovat souvislost i mezi sekundární úpravou tavenin, množstvím aktivního kyslíku v takto upravených taveninách a mezními hodnotami dilatačních dějů.



Obr. č. 145 Souvislost množství aktivního kyslíku v tavenině s maximální expanzí L2max. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám tavenin.



Obr. č. 146 Souvislost množství aktivního kyslíku v tavenině s grafitickou expanze L2max-L1min. Barvy odpovídají jednotlivým úpravám taveniny.

5. Závěr

V rámci řešení doktorské práce byla použita řada laboratorních i provozních metod : dilatační a termická analýza, chemická analýza, optická metalografie, defektoskopické zkoušky, zkouška ultrazvukovým tloušťkoměrem, matematické metody derivace změřených průběhů sledovaných dějů, prokládání trendové funkce se stanovením jejího maximálního stupně spolehlivosti a další. Na základě uvedených výsledků a získaných poznatků lze formulovat následující dílčí závěry:

1) Byla provedena laboratorní i praktická měření na zkušebních odlitcích : *válcové tyče,válcového špalku* a v uvedených případech byly zároveň ze stejné taveniny vyrobeny odlitky sériové: *brzdový buben ŠKODA* (LLG) a *rošt ŠKODA* (LČG).

2) Pro měření dilatačních dějů probíhajících během tuhnutí a chladnutí sekundárně upravených tavenin byl s úspěchem odzkoušen přístroj CZAH DO-1 spolu s konstrukcí zkoušky (VŠ) podle NANDORIHO.

3) Výsledky měření u LLG neprokázaly jednoznačnou a přímou vazbu mezi množstvím grafitizačního očkovadla a grafitickou expanzí L2max – L1min, či celkovou maximální expanzí L2max.
U LČG, LKG byla tato relativní závislost nalezena a vliv většího množství grafitizačního očkovadla spolu s větším množstvím modifikátoru se pozitivně odrazil v menší hodnotě jak na grafitické expanzi L2max– L1min, tak i na celkové maximální expanzi L2max.

4) Byl zjištěn odlišný a relativně malý vliv licí teploty u jednotlivých typů litin. U LLG je vliv vyšší licí teploty relativně pozitivní na nižší hodnoty maximální expanze L2max a omezuje vznik vnitřních vad odlitků, na rozdíl od LČG,LKG kde byl zjištěn trend negativní.

5) Vzhledem k velkému rozptylu dilatačních hodnot grafitické expanze u LLG je pravděpodobné, že zde má významnou roli kvalita a kvantita zárodků v tavenině, předurčená skladbou vsázky, tavícím agregátem, režimem tavení, stupněm přehřátí taveniny a dobou setrvání na ní. Absence vhodných podkladů a údajů o stavu zárodků neumožnila bližší hodnocení tohoto důležitého vlivu na průběh dilatace tuhnoucích tavenin.

6) Byla zjištěna relativní souvislost délky eutektické reakce a počtu eutektických buněk, jak s hodnotami maximální expanze a hodnotami grafitické expanze, tak s výskytem vad v odlitcích na základě grafitického očkování tavenin.
U LLG je vyšší počet eutektických buněk nevýrazně, mírně negativní faktor a zvyšuje maximální expanzi L2max spolu se vznikem vnitřních vad odlitků. U LČG, LKG byl zjištěn trend právě opačný.

7) Výsledky měření na dilatometru společně s množstvím nalezených vnitřních vad u sériových odlitků odlévaných do forem s JBFS prokázaly jejich relativní spojitost s vlivem sekundárních úprav tavenin.
U LLG byl nalezen negativní vliv většího množství grafitizačního očkovadla, na rozdíl od LČG, LKG , kde byl vliv většího množství grafitizačního očkovadla zároveň s větším množstvím modifikátoru trendově pozitivní.

Vlastní přínos předložené práce

Doktorská práce shrnuje a rozšiřuje poznatky o vlivech působících na průběh tuhnutí grafitických litin a hledá jejich přímou souvislost se vznikem heterogenních vad v odlitcích. Sledované děje byly detailně zhodnoceny pomocí dilatačních a teplotních křivek.

Vzhledem k množství prostudované literatury a relativně velkému počtu měření na dvou konstrukčně odlišných zařízeních je hlavní přínos práce v šířce zpracovaného datového souboru. Pro potřeby měření se použilo množství různých slitin (LLG, LČG, LKG, AlSi a Al) spolu s různými tavícími agregáty (indukční pec, plynová pec, kupolní pec) v celkem šesti slévárnách. Relativně detailní rozbor jednotlivých činitelů či souvislostí uplatňující svůj vliv na velikost grafitické a maximální expanze trendově naznačil, které ze studovaných vlivů jsou v netrvalé pískové formě hlavním zdrojem vnitřních vad odlitků.

U LLG práce zviditelnila nejednoznačné postavení samotného grafitického očkování v souvislosti s dilatačními ději a převážně negativním vlivem na výsledné vnitřní vady odlitků odlévaných do forem z JFBS. U obou zkušebních odlitků (VT, VŠ) bylo dosaženo maximální grafitické expanze do cca 0,4% množství vnášeného očkovadla, při dalším navyšování se dosáhlo nižších či maximálně stejných hodnot dilatace. V praxi je proto nutné optimalizovat očkovací proces se zaměřením na požadované užitné vlastnosti odlitku a jeho konkrétní konstrukci. S větším množstvím očkovadla se pozitivně zamezí metastabilnímu tuhnutí v tenčích stěnách, ale současně se vlivem grafitické expanze litiny působící na stěny formy může vyskytovat porezita v tepelných uzlech odlitku.

U LČG,LKG byl zjištěn pozitivní trend vlivu většího množství grafitického očkovadla současně s větším množstvím modifikátoru na nižší hodnoty dilatace a relativně nižší výskyt vad homogenity u sériových odlitků.

Vzhledem k nevýrazným souvislostem grafitizačního očkování a dilatačních dějů u LLG doporučuji při dalším výzkumu dané problematiky zahrnout do hodnotících údajů i vliv vsázky a tavícího agregátu, jak již bylo zdůrazněno v předchozích kapitolách. U studia LČG,LKG doporučuji zahrnout do souboru zkoušek i měření úrovně množství aktivního kyslíku po provedených sekundárních úpravách taveniny v souvislosti s dezoxidačními a návazně dilatačními ději tuhnoucí taveniny, v závislosti na výskytu vad homogenity u sériových odlitků.
Za zcela nový poznatek je možno uvažovat rozdílný výsledek a funkci grafitického očkování u LLG a LČG,LKG.

Použitá literatura :

[1] ELBEL T. a kolektiv : Vady odlitků ze slitin železa . MATECS Brno 1992
[2] VETIŠKA A. a kolektiv. : Teoretické základy slévárenské technologie. SNTL/ALFA Praha 1972
[3] VONDRÁK V. : Technologie litinových odlitků. Henry Kyncl , TURNOV PSČ 511 01 skripta 1998
[4] PÍŠEK F. – PLEŠINGER A. : Slévárenství – I , Obecná část . SNTL , Praha 1974
[5] PAVLÍK I. : Výzkum činitelů ovlivňujících vznik ředin a staženin v odlitcích ze šedé litiny. SVUM Brno 1975
[6] GEDEONOVÁ Z. : Dlžkové zmeny při tuhnutí grafitických liatin a výsledná kvalita odlitku. Slévárenství č.9 2001, strana 513 – 523.
[7] DÚL J., NÁNDORI G., SZALAI G., GEDEONOVÁ Z. : Einfluss verschiedener Formstoffparameter auf die Massänderungen von Abgussen aus Gusseisen wahrend der Erstarrung. Giesserei-Praxis 2/01, strana 75 – 80.
[8] SÝKORA P. : Použití karbidu křemíku při výrobě LLG a LGG, Slévárenská ročenka 1999, stana 154 – 163, Česká slévárenská společnost
[9] HUMMER R. : Beurteilung der Lunkerneigung von Gusseisen mit Kugelgraphit mittels Abkühl- und Längenänderungskurven, Giesserei-Praxis, 9/10-1989, stana 142 – 151.
[10] WOLF G. : Vývojové trendy při výrobě litiny, Slévárenství, XLIII, 1995 č. 5 , strana 284 – 290.
[11] KRUTZNER F., PACYNA H., DOPP R. : Möglichkeit und Grenzen des speiserlosen Giessen bei Gusseisen. Giessereiforschung 50 , 1998 Nr.1, strana 25-28.
[12] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 1. Einfluss des Formstoffes auf die Formwandbewegung bei zylindrischem Formhohlraum. Giesserei 60 (1973) č. 21, strana 669 - 675.
[13] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 2. Einfuss von Gestalt und Verdichtung der Sandform auf die Bewegung der Formwand. Giesserei 60 (1973) č.21, strana 676 - 681.
[14] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 3. Formstaffeinfluss beim Giessen und Erstaren von Gusseisen mit Lamellgraphit. Giesserei 60 (1973) č. 23, strana 725 – 731.
[15] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 4. Metalleinfluss beim Giessen und Erstarren von Gusseisen mit Lamellengrap. in Sandformen. Giesserei 60 (1973) č. 26, strana 832 - 838
[16] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 5. Metalleinfluss beim Giessen und Erstarren von Aluminium-Kupfer-Legierung und AlSi12,5 in Sandformen. Giesserei 60 (1973) č. 26, strana 839 - 843
[17] JELÍNEK P., VONDRÁK V. : Studie stahování litin II. a III. Výzkumná zpráva, VŠB Ostrava, Katedra slévárenství, 1975
[18] HAVLIČEK F. : Kapitoly z teplofyziky odlitku a formy. VŠB Ostrava, Katedra slévárenství, 1970
[19] NÉMETHOVÁ P. : Sledování teplotních polí po odlití v systému litinová kokila – odlitek tvaru desky. Diplomová práce, TU – Liberec,1992
[20] ŠLAHORA P. : Stanovení významu obsahů a druhů vazeb kyslíku na výskyt charakteristických vad v odlitcích z litiny. Výzkumná zpráva. SVÚM a.s. Brno, 1998

[21] KONEČNÝ L., EXNER J., NOVÁ I. : Aktivita kyslíku u grafitických litin. Závěrečná zpráva grantového projektu, GA ČR 106/95/0171, TU Liberec, 1998
[22] JELÍNEK M. : Kvantifikace vlivu aktivity kyslíku na strukturu a vlastnosti grafitických litin. Disertační práce, TU Liberec, 2002
[23] SOČENKO O. : Agregativnyj mechanizm formirovanija grafita v ČŠG, Izvestija vysšich učebnych zavedenij, Černaja metallurgija, 8, 1990, str. 71-74
[24] KARSAY S.: Ductile Iron I – Production, Qit – Fer Et Titane Inc.,Montreal,1976
[25] ŠENBERGER J.:Kyslík v litinách během jejich výroby a jeho vliv na vlastnosti litin, In: 14. celostátní konference Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem, Brno, září 2000, stra. 34 –41
[26] BASDOGAN M., BENNET G., KONDIC V. : Effects of Sulphur and Oxygen on Solidification of Grey Cast Iron, University of Birmingham, Department of Metallurgy, 1989,str. 240 - 247
[27] HUMMER R . : Praktische Anwendung der Sauerstoffaktivitätsmessung zur Qualitätssicherung von Schmelzen für Gusseisen mit Kugelgraphit. Giesserei, 1991, 24, str. 884 - 889
[28] EXNER J. : Nepublikované podklady výsledků studia vývoje výroby bloků motorů LIAZ ze šedé a legované litiny ČSN 42 2425. LIAZ 04 Slévárna Ostašov, Liberec, 1970 – 1989.
[29] HOMOLA M.,ČECH J., SOCHOR S. : Optimalizace slévárenské technologie ve slévárně ŽĎAS a.s. , Žďár nad Sázavou pomocí programu firmy MAGMA. Slévárenství číslo 6, 1995, strana 392 – 396.
[30] BAŘINOVÁ D., BALOUN A.: Program MAGMASOFT šetří miliony. ŠKODA MOBIL číslo 13, 1999, strana 3.
[31] HAVLÍČEK F. : Teorie slévárenství. Výběr přednášek, VŠB Ostrava, Fakulta FMNI, 1992.
[32] VONDRÁK V. : Sekundární metalurgie litin. Výběr přednášek. VŠB Ostrava, Fakulta FMMI, 1994
[33] CZIKEL J. : Die Kugellunkerprobe. Freiberg Forschungshefte. 4. Giesser-tagung. Díl 1.Strana 209 – 226, 19. –20. 5. 1958
[34] CZIKEL J. : Über das Lunkerverhälten von grauem Gusseisen. 4. Giesser-tagung. Díl 2. strana 12 – 21, 19. – 20. 5. 1958
[35] VONDRÁK V. : Sekundární metalurgie litin. VŠB Ostrava. FMMI, 1996
[36] DRÁPAL S. : Tepelné zpracování litinových odlitků. SNTL, Knižnice strojírenské výroby 121, Praha 1966.
[37] ELKEM ASA : Odborná dokumentace k nabízeným očkovadlům firmy Elkem. z Norského originálu přeložila firma METOS s r.o. Chrudim, 2000.
[38] ROUČKA J. : Metalurgie litin. Učební texty,VUT – Brno, FS, PC-DIR sro. 1998
[39] PIWOWARSKY E. : Hochwertiges Gusseisen, seine Eigenschaften und die physikalische Metallurgie seiner Herstellung. Berlin, Springer – Verlag. 1942
[40] ROUČKA J. : Použití termické analýzy pro hodnocení struktury slitin Al –Si. Habilitační práce. VUT Brno. 1996
[41] PŘIBYL J., VONDRÁK V.: Studium stahování tvárné litiny. Výzkumná zpráva VŠB Ostrava, 1967.
[42] VONDRÁK V., BENEŠ J.: Komplexní rozbor očkování šedé litiny . Výzkumná zpráva VŠB Ostrava, 1970.
[43] LEVELINK H.G.: 8. odborná přednáška na 39. MSK Filadelfie, 1972.
[44] PLEŠINGER A.M.: Vady odlitků ze šedé litiny . Praha 1952.
[45] ANDERSON J., GERHARDT P., FORREST R., RODTER H.:Litina s kuličkovým grafitem. Nejdůležitější o vtokové soustavě a nálitkování. QIT-Fer et Titane Inc. Montreal, Kanada, Vydavatel pro SR a ČR Fompe s.r.o., bez udání roku.

[46] SKOČOVSKÝ P., MATEJKA M.: Mikroštruktúra liatin. Metalografická príručka. Fompex s.r.o. Edičné stredisko VŠDS. Žilina ,1994.
[47] KÖHLER B. : Formwand und Metallwandbewegungen beim Giesvorgang und wahrend des Erstarrens von Guseisen in Sandformen. Disertační práce. Aachen. 1971.
[48] HOUŠŤ M. : K problémům staženin a ředin u odlitků ze šedé litiny. Slévárenství 1964, číslo 9, strana 352 – 356.
[49] SKRBEK B. VODIČKA P.: Zkušenosti s provozováním ultrazvukové rychlozkoušky účinku modifikátoru. Konference „Očkovadla a předslitiny, sborník, INPEKO Žilina, 1991,str. 112 – 118
[50] HORÁK L., HÁLA M.: Současný stav provozní kontroly jakosti šedé litiny pomocí termické analýzy ve slévárnách oborového podniku ŠKODA (Plzeň). Výzkumná zpráva č. 715 – 091 – 2151/7. Plzeň 1980.
[51] JURA S. BOREK H. SAKWA J. : Differential analysis of the process of cast iron solidification. 46 th international foundry congres. Polonia. 1979
[52] HRIBOVSEK B.J., MARINCEK B.: Thermal analysis of bulk solidified cast iron melts. Institut der metallurgie. Eidgenóssische Technische Hochschule Zúrich. Str. 659 – 672. 1975
[53] HAMPL J., VONDRÁK V., VÁLEK T.: Objemové změny litiny s lupínkovým grafitem, jako funkce parametrů ochlazovací křivky. TU Ostrava, Katedra slévárenství, Sborník mezinárodní konference Spolupráce 2002, str. 107-111.
[54] VONDRÁK V., PAVLÍČKOVÁ M.: Vliv aktivity uhlíku a křemíku na průběh očkování litin a hloubku zákalky. TU Ostrava, Katedra slévárenství, Sborník mezinárodní konference Spolupráce 2002 , str. 113 – 117.
[55] GEDEONOVÁ Z., DÚL J.: Dĺžkové zmeny pri tuhnutí grafitických liatin a výsledná kvalita odliatkov. HF TU Košice, Katedra metalurgie železa a zlievárenstva, Sborník mezinárodní konference Spolupráce 2002, str. 127 – 134.
[56] NOVÁ I.: Tepelné pochody ve slévárenských formách. TU Liberec, Katedra strojírenské technologie, 2000.
[57] KONEČNÝ L., JELÍNEK M.: Stanovení optimální modifikace hořčíkem tvárných litin pomocí měření aktivit kyslíku. In.: 8. Mezinárodní metalurgický veletrh a sympisium. Metal99, Ostrava 1999, strana 260 – 268.
[58] NOVÁ I., EXNER J., KALINA M. : Simulace tuhnutí jako účinný nástroj řešení homogenity odlitků. Slévárenství č. 4, 2000, strana 203 – 206.
[59] MORES A.: ‚Řediny a staženiny u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem a způsoby jejich hodnocení. Slévárenská ročenka 2001, strana 128 – 138.
[60] KOCHEISEN K.: Volumenfehler bei Guseisen mit Lamellen und Kugelgraphit Giesserei – Forschung č.1, ročník 24, 1972, strana 27 – 37.
[61] UNGERMAN J.: Řediny a nedodržení tvrdosti u odlitků ze šedé litiny a způsoby zabránění těmto vadám. Slévárenství č. 11, 1971, strana 471 – 473.
[62] NANDORI G. : Charakteristika litějnoj doperlitnoj usadki serovo čuguna Litejnoej proizvodstvo č. 11, 1963, strana 32 – 35.
[63] BRADÍK J.: Výzkumná zpráva o litinách , SVÚM Z – 59 – 739.
[64] GORENKO V., KOMPANIČENKO V., RAZDOBARINI. : Litějnaja usadka belovo polovinčatovo i serovo čuguna s plastinčatym grafitom. Liteinoje proizvodstvo č.2 , 1975, strana 10 – 12.
[65] CZAH – Pomiar Spolka z o.o.: Dylatometr odlewniczy DO-1. Návod k použití. Katovoce. 2001.
[66] CZAH – Pomiar Spolka z o.o.: CRYSTALDIGRAPH PC-2T. A/D převodník, návod k použití. Katovice . 2001.
[67] SKRBEK B.: Nedestruktivní diagnostika vlastností litin. Slévárenství č. 8 – 9, ročník XLVII, 1999, strana 505 – 508.

[68] HAVLÍČEK F. : Studium tepelně-fyzikálních vlastností formy. Slévárenství č. 9, ročník XVII, 1969, strana 366 – 372.
[69] PÍŠEK Fr. : Nauka o materiálu II., ČSAV, Praha 1956, str.: 533 – 540.
[70] GEDEONOVÁ Z., JELČ I.: Metalurgia liatin, HF, TU Kišice, 2000.
[71] NOVÁ I. : Tepelné procesy ve slévárenských formách, TU Liberec, 2002
[72] Hodnocení metalografické struktury litin EN ISO 954 (dříve ČSN 42 0461)
[73] HAMPL J., VÁLEK T., VONDRÁK VI. : Objemové smrštění litin mezi teplotou lití a tuhnutí. Slévárenství č. 4-5 2003, str. 186 – 189.

Resumé

Disertační práce se zabývá vlivem podmínek grafitizace litin (LLG, LČG, LKG) na vznik ředin a staženin v odlitcích litých do netrvalých pískových forem.

V úvodní části jsou shrnuty současné poznatky o vzniku a průběhu vad homogenity. Ty jsou doplněny o vliv jednotlivých parametrů mezi než patří : chemické složení slitiny, odlévací teplota, sekundární zpracování taveniny, materiál netrvalé slévárenské formy a řada dalších. Za velmi důležité jsou považovány tepelně-fyzikální vlastnosti kovu i slévárenské formy, které celý průběh tuhnutí taveniny zásadním způsobem determinují. V současné době se tyto znalosti využívají společně s výpočetní technikou pro tvorbu simulačních výpočtů, které již v přípravné fázi dokáží s určitou pravděpodobností odhalit vnitřní vady odlitků.

S pomocí zařízení ke sledování dilatací tuhnoucí taveniny byly u zkušebních odlitků válcové tyče (tepelné uzly v horizontální ose odlitku) a válcového špalku (tepelný uzel ve vertikální ose odlitku) vyhodnoceny průběhy dilatačních a teplotních křivek uvedených typů litin. Změřené hodnoty grafitické a celkové expanze byly systematicky porovnávány a graficky vyhodnoceny s činiteli ovlivňujícími či souvisejícími s grafitizací, jako jsou : množství a druh očkovadla, odlévací teplota, charakteristika grafitu ve ztuhlém odlitku, chemické složení litiny, doba trvání eutektické reakce, počet eutektických buněk, rychlost stoupání dilatačních křivek při grafitické expanzi a sklon litiny k tvorbě zákalky.
Pro porovnání laboratorních zkoušek byla provedena i provozní měření společně se sériovými odlitky brzdového bubnu (LLG) a roštu (LČG).

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že nebyl nalezen významný přímý vliv či jednoznačný parametr určující výskyt a velikost vnitřních vad odlitků. Vedle nevýrazného vlivu odlévací teploty či typu vyloučeného grafitu má vliv množství a druh očkovadla, počet eutektických buněk a doba trvání eutektické reakce trendový charakter. Výrazná souvislost byla potvrzena jen u vlivu grafitické expanze na celkovou expanzi dilatující tuhnoucí taveniny.
Při zkoumání vlivu grafitického očkování na výskyt vnitřních vad v odlitcích odlévaných do JBFS byl u LLG nalezen jeho negativní vliv. U LČG, LKG byl při sekundárním grafitickém očkování nalezen vliv naopak pozitivní.

Pro jednoznačnější a souhrnné hodnocení je do budoucna nutné sledovat a zvlášť vyhodnotit také vlivy skladby vsázky, vedení tavby a typu tavícího agregátu, které se dle obecných zkušeností mohou výrazně, často však i protichůdně, projevovat na tvorbě a stavu zárodků v tavenině. Praktické zkoušky by měly být doplněny o měření množství aktivního kyslíku v tavenině.

Klíčová slova : Litina, očkování, modifikace, grafitická expanze, dilatace

Digest

The dissertation deals with the influence of the conditions for the graphitisation of cast iron (LLG, LČG, LKG) on the occurrence of shrinkage porosity and shrinkage cavities in castings made using impermanent sand moulds.
The introductory part summarises the existing knowledge base about the occurrence and progress of homogeneity defects. These are supplemented with the influence of parameters among which also rank: the chemical composition of the castings, casting temperature, secondary processing of molten mass, material of the impermanent sand moulds and many others. Quite important are the thermal-physical characteristics of the metal and the casting mould that in a fundamental way determine the progress of the solidification of the molten mass. At present this knowledge is used in conjunction with computer technology to create simulation calculations that already at the preparatory phase can with a certain probability uncover the internal defects of the castings.

Progress of the dilatation and temperature curves of the given types of castings for trial castings of rolled bars (thermal node in the horizontal axis of the casting) and rolled blocks (thermal node in the horizontal axis of the casting) were evaluated with the aid of equipment for monitoring the dilatation of the solidifying molten mass. The measured graphite values and general expansion were systematically compared and graphically evaluated with the elements influencing or related to graphitisation, such as: quantity and type of inoculant, casting temperature, characteristics of the graphite in the solidified casting, chemical composition of the cast iron, duration of the eutectic reaction, number of eutectic cells, speed of the rise of the dilatation curves during graphitic expansion and hardening tendency of the cast iron. For comparison of the laboratory tests, a practical measurement of the castings of series drums (LLG) and cylinder grid bars (LČG) was also performed.

From the ascertained results, it follows that no major direct influence or unambiguous parameter that determines the occurrence and size of the internal defects of the castings was found. Apart from the inconsequential influence of the casting temperature or type of graphitic deposit, the volume and type of inoculant, number eutectic cells and duration of the eutectic reaction have a trend character. Pronounced contiguity was confirmed only for the influence of graphitic expansion on the general expansion of the dilating solidifying molten mass.

When examining the graphitic inoculation of the LLG, its negative influence was found unlike LČG, LKG, where secondary graphitic inoculation had a positive influence on the occurrence of internal defects.

For clearer summary evaluation, it will in future be essential to monitor and especially also evaluate the influence of the composition (structure) of the charge, management of the smelting process and type of smelting aggregate that according to general experience may substantially, but also often also negatively manifest themselves in the creation and state of nuclei in the molten mass. Practical tests should be supplemented with the measurement of the volume of active oxygen in the molten mass.

Keywords: cast iron, inoculation, modification, graphitic expansion, dilatation

Přílohy

Tabulka č. 23 – soubor dat zkoušek s válcovou tyčí (VT)

Tabulka č. 24 - A,B,C – soubory dat zkoušek s válcovým špalkem (VŠ)

Obrázky č. 147 - 180 – průběhy dilatací a teplot , derivace, teplota-dilatace, Metalografický rozbor – grafit, eutektické buňky (u vybraných zkoušek s VT, VŠ a jim odpovídajícím sériovým odlitků)

Pořadové číslo zkoušky	Druh litiny a její sekundární metalurgické úpravy	Slévárna, tav.ag	
1	LLG + očk. Zircinok 1,5%	SL Ostašov, kupl.	JBF
2	LLG + očk. Zircinok 1%	SL Ostašov, kupl.	JBF
3	LLG + očk. FeSi75 0,4%	TU Liberec, induk.	JBF
4	LLG + očk. Superseed 0,3%	SL Ostašov, kupl.	JBF
5	LLG - neočkováno	SL Ostašov, kupl.	JBF
6	LLG + očk. Superseed 0,3%	SL Ostašov, kupl.	JBF
7	LKG ,mod.FeSiMg 1,2%+očk.Superseed 0,4%	TU Liberec, induk.	JBF
8	LKG, zk.č. 7 po 40 minutách, neupravováno	TU Liberec, induk.	JBF
9	LČG,mod.FeSiMg 0,8%+očk.FeSi75 0,6%,Supers.0,4%	TU Liberec, induk.	JBF
10	LČG, zk.č. 9 po 50 minutách, neupravováno	TU Liberec, induk.	JBF
11	LLG + očk. Zircinok 0,12%	SL Ostašov, kupl.	JBF
12	LLG - neočkováno	SL Ostašov, kupl.	JBF
13	LLG + očk. Zircinok 0,15%	SL Ostašov, kupl.	JBF
14	LLG - neočkováno	SL Ostašov, kupl.	JBF
15	LLG + očk. Zircinok 0,15%	SL Ostašov, kupl.	JBF
16	LLG + očk. Zircinok 0,3%	SL Ostašov, kupl.	JBF
17	LLG - neočkováno	TU Liberec, induk.	JBF
18	LLG + očk. Superseed 1,5%	TU Liberec, induk.	JBF
19	LLG + očk. Zircinok 0,45%	TU Liberec, induk.	JBF
20	LČG,mod.FeSiMg 0,8%+očk.FeSi75 0,5%,Supers.0,2%	TU Liberec, induk.	JBF
21	LČG, zk.č. 20 po 50 minutách, neupravováno	TU Liberec, induk.	JBF
22	LČG,mod.FeSiMg 0,4%+očk.FeSi75 0,5%,Supers.0,2%	TU Liberec, induk.	JBF
23	LČG, zk.č. 22 po 60 minutách + očk.Superseed 0,5%	TU Liberec, induk.	JBF

Tabulka č. 23 Přehled výsledků dilatačních zkoušek na zkušebním odlitku *válcové tyče*, bíl

my %C	%Si	%P	%S	%Mg	CE (%)	Sc	zákalková zkouška (mm)	Licí teplota (°C)	T max naměřená (°C)	tL(s)	TL (°C)	ts1(s)	ts
5	2,09	0,111	0,081		4,13	1,01	1	1354	1250	18	1221	45	310
2	2,26	0,148	0,083		4,26	1,05	1	1333	1215	15	1193	38	285
3	3,08	0,07	0,031		4,18	1,06	0	1371	1370	50	1238	100	317
3	1,98	0,12	0,08		4,02	0,98	1	1330	1210	18	1190	55	262
7	1,76	0,11	0,08		3,97	0,96	10	1336	1255	20	1218	47	285
5	2,11	0,12	0,08		4,04	0,99	1	1342	1242	20	1208	40	225
	2,54	0,067	0,013	0,010	4,66	1,19	4	1436	1270	23	1212	48	390
	2,51	0,065	0,013		4,47	1,13	7	1401	1170	18	1165	30	215
	2,72	0,064	0,013	0,003	4,68	1,20	1	1394	1252	15	1215	55	315
	2,63	0,061	0,015		4,48	1,14	5	1388	1280	38	1200	45	300
	1,77	0,111	0,075		3,86	0,93	5	1377	1278	30	1215	43	255
	1,87	0,241	0,086		4,20	1,02	4	1360	1242	28	1195	45	250
	1,96	0,267	0,077		4,29	1,05	2	1353	1238	22	1185	41	220
	1,31	0,132	0,072		3,85	0,92	50	1371	1270	20	1205	38	258
	1,4	0,128	0,067		3,95	0,95	8	1362	1271	15	1208	40	240
	1,69	0,15	0,072		3,91	0,94	6	1385	1235	20	1210	38	255
	2,13	0,121	0,073		3,82	0,93	30	1379	1360	22	1235	45	330
	3,65	0,125	0,073		3,97	1,01	1	1450	1425	45	1235	55	325
	1,73	0,079	0,07		3,26	0,77	5	1382	1240	33	1205	65	290
	2,33	0,069	0,016	0,019	4,44	1,11	4	1406	1275	25	1200	50	300
	2,59	0,071	0,014		4,28	1,07	2	1384	1278	27	1200	55	288
	2,19	0,045	0,015	0.009	4,33	1,08	30	1398	1320	28	1185	45	345
	2,55	0,046	0,015		4,34	1,09	1	1366	1285	18	1171	50	286

venina LLG, sv.modré řádky tavenina LČG a LKG.

tS1(s)	tS2(s)	TS2(°C)	tS2 - tS1 (s)	t2max (s)	L2max (mm)	T2max (°C)	tangenta úhlu alfa (mm/s)	Eutektické buňky v ose zk. odlitku (EB/mm2)	velikost grafitu v ose zkušebního odlitku	rozložení v zkuš
310	985	265	220	0,755	1082	0,0042	120	4/3	A	
285	968	247	205	0,797	1085	0,0123	140	4	A	
317	983	217	341	0,475	970	0,0065	60	4(6)	A/B	
262	993	207	226	0,515	1064	0,0017	110	4	A	
285	1050	238	218	0,81	1088	0,0052	90	4(6)	A/B	
225	1040	185	210	0,616	1070	0,0038	70	4	A(B)	
390	992	342	305	1,175	1032	0,0111	180	6		
215	1065	185	175	0,595	1100	0,0041	50	4(5)	A(B)	
315	1045	260	245	1,247	1090	0,0135	160	6/7		
300	1015	255	215	0,863	1060	0,0085	80	4/3	B(A)	
255	1070	212	250	0,347	1075	0,0013	100	4(5)	A(B)	
250	1050	205	170	0,478	1120	0,0023	50	4(5)	B(A)	
220	1065	179	222	0,587	1065	0,0073	100	4	B/A	
258	1045	220	215	0,666	1080	0,0065	40	5/6	A/D	
240	1042	200	210	0,766	1055	0,0021	80	4/5	A	
255	1062	217	190	0,991	1090	0,0134	130	4/5	A	
330	1012	285	270	0,948	1052	0,0055	70	4(5)	A/B	
325	1045	270	290	1,105	1065	0,0092	140	4(5)	A(D)	
290	1048	225	210	1,087	1106	0,0171	130	5	A(D)	
300	1012	250	255	1,301	1041	0,0132	140	6		
288	1035	233	234	1,051	1080	0,0098	50	3	C	
345	1010	300	270	1,177	1065	0,0121	80	7		10
286	99	236	248	0,868	1025	0,0092	60	3(5)	C	

...ta úhlu alfa (mm/s)	Eutektické buňky v ose zk. odlitku (EB/mm2)	velikost grafitu v ose zkušebního odlitku	rozložení grafitu v ose zkušebního odlitku	% globulárního grafitu v ose zkušebního odlitku	relativní rychlost zvuku Vr
120	4/3	A			0,655
140	4	A			0,651
60	4(6)	A/B			0,672
110	4	A			0,729
90	4(6)	A/B			0,767
70	4	A(B)			0,721
180	6			95	0,952
50	4(5)	A(B)		0	0,676
160	6/7			95	0,955
80	4/3	B(A)		0	0,696
100	4(5)	A(B)			0,839
50	4(5)	B(A)			0,766
100	4	B/A			0,701
40	5/6	A/D			0,811
80	4/5	A			0,778
130	4/5	A			0,801
70	4(5)	A/B			0,819
140	4(5)	A(D)			0,776
130	5	A(D)			0,856
140	6			90	0,952
50	3	C		0	0,577
80	7			10+Expl	0,898
60	3(5)	C		0	0,602

Pořadové číslo zkoušky	Druh litiny a její sekundární metalurgické úpravy	
1	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liber
2	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liber
3	LLG - očkovaná 0,5 % FeSi75	TU Liber
4	LLG - očkovaná 0,5 % FeSi75	TU Liber
5	LLG - očkovaná 0,5 % FeSi75	TU Liber
6	LKG - modifikovaná 1,0% FeSiMg 0,5%FeSi75 - sekund. neočkovaná	TU Liber
7	LLG - očkovaná 0,5 % FeSi75	TU Liber
8	LLG - očkovaná 0,5 % FeSi75	TU Liber
9	LLG - očkovaná 0,5 % FeSi75	TU Liber
10	LČG - neupravovaná tavenina před modifikací	SL ŠKOD
11	LČG - modifikovaná 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 - sekund. neočkovaná	SL ŠKOD
12	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,5%SUPERSEED	SL ŠKOD
13	LČG - neupravovaná tavenina před modifikací	SL ŠKOD
14	LČG - modifikovaná 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 - neočkovaná	SL ŠKOD
15	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,5%SUPERSEED	SL ŠKOD
16	LČG - neupravovaná tavenina před modifikací	SL ŠKOD
17	LČG - modifikovaná 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 - sekund. neočkovaná	SL ŠKOD
18	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,2%SUPERSEED	SL ŠKOD
19	LČG - modifikovaná 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 - sekund. neočkovaná	SL ŠKOD
20	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,5%SUPERSEED	SL ŠKOD
21	LČG - modifikovaná 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 - sekund. neočkovaná	SL ŠKOD
22	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,5%SUPERSEED	SL ŠKOD
23	LČG - neupravovaná tavenina před modifikací	SL ŠKOD
24	LLG+P - neupravovaná tavenina	SL ŠKOD
25	LLG+P - očkovaná 0,3% LMC + 0,2% FeSi75 do licí pánve	SL ŠKOD
26	LLG+P + očkováná 0,3% LMC	SL ŠKOD
27	LLG+P - neupravovaná tavenina	SL ŠKOD
28	LLG+P - očkovaná 0,3% LMC + 0,4% FeSi75 do licí pánve	SL ŠKOD
29	LLG - neupravovaná tavenina	SL Turno
30	LLG - očkovaná 0,3% ZIRCINOK	SL Turno
31	LLG - očkovaná 0,3% SUPERSEED	SL Turno
32	LKG - modifikovaná 1,5% FeSiMg 0,5%FeSi75 + očk.0,2%SUPERSEED	SL Turno
33	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75	SL Turno
34	LKG - modifikovaná 1,5% FeSiMg 0,5%FeSi75 + očk.0,2%SUPERSEED	SL Turno
35	LLG - očkovaná 0,3% SUPERSEED	TU Liber
36	LLG - očkovaná 0,3% SUPERSEED	TU Liber
37	LKG - mod.FeSiMg 1,2%+očk.Superseed 0,4%	TU Liber
38	LKG - mod.FeSiMg 1,2%+očk.Superseed 0,4%	TU Liber

Tabulka č. 24-A Přehled výsledků dilatačních zkoušek na zkušebním odlitku *válcového špalku*,

Slévárna, tav.agregát	Druh formy	%C	%Si	%P	%Mg	CE (%)	Sc	zákalková ... (mm)	T max	
Liberec, induk.	JBFS	3,45	2,60	0,061		4,13	1,01	nehodn.	1253	pr
Liberec, induk.	CT	2,54	1,81	0,096		3,04	0,69	nehodn.	1274	pr
Liberec, induk.	JBFS	2,64	1,81	0,096		3,14	0,72	nehodn.	1318	pr
Liberec, induk.	CT	2,30	1,80	0,09		2,80	0,63	nehodn.	1320	pr
Liberec, induk.	JBFS	2,30	1,80	0,09		2,80	0,63	nehodn.	1318	pr
Liberec, induk.	CT	3,16	3,39	0,057	0,004	4,04	0,99	nehodn.	1330	pr
Liberec, induk.	JBFS	3,41	3,82	0,056		4,39	1,11	nehodn.	1349	pr
Liberec, induk.	CT	3,20	3,80	0,056		4,18	1,04	nehodn.	1258	pr
Liberec, induk.	JBFS	2,98	3,78	0,059		3,95	0,97	nehodn.	1318	pr
ŠKODA, induk.	CT	3,75	1,61	0,024	0,000	4,16	1,00	12	1265	1
ŠKODA, induk.	CT	3,62	2,25	0,026	0,020	4,20	1,02	26	1308	5
ŠKODA, induk.	CT	3,60	2,40	0,024	0,017	4,21	1,03	12	1292	5
ŠKODA, induk.	CT	3,81	1,60	0,021	0,000	4,22	1,02	20	1356	6
ŠKODA, induk.	CT	3,89	2,11	0,022	0,015	4,43	1,08	18	1287	6
ŠKODA, induk.	CT	3,90	2,44	0,022	0,019	4,52	1,12	12	1271	2
ŠKODA, induk.	CT	3,93	1,57	0,019	0,000	4,33	1,05	10	1295	4
ŠKODA, induk.	CT	3,81	2,08	0,02	0,016	4,34	1,06	25	1307	1
ŠKODA, induk.	CT	3,88	3,62	0,02	0,020	4,80	1,24	2	1277	3
ŠKODA, induk.	CT	3,52	2,41	0,023	0,015	4,13	1,00	28	1249	2
ŠKODA, induk.	CT	3,44	2,62	0,021	0,014	4,10	1,00	8	1281	2
ŠKODA, induk.	CT	3,36	2,36	0,018	0,015	3,95	0,95	45	1282	1
ŠKODA, induk.	CT	3,31	2,59	0,019	0,014	3,96	0,96	7	1268	5
ŠKODA, induk.	CT	3,54	1,69	0,018	0,000	3,97	0,95	10	1303	4
ŠKODA, induk.	CT	2,74	1,66	0,679		3,49	0,78	38	1280	4
ŠKODA, induk.	CT	2,74	1,78	0,691		3,53	0,78	3	1236	3
ŠKODA, induk.	CT	2,86	1,84	0,708		3,68	0,83	4	1235	2
ŠKODA, induk.	CT	2,81	1,68	0,707		3,58	0,80	30	1221	1
ŠKODA, induk.	CT	2,72	1,82	0,691		3,52	0,78	2	1230	3
Turnov, kuplov.	CT	3,24	2,22	0,156		3,87	0,92	10	1188	2
Turnov, kuplov.	CT	3,12	2,20	0,155		3,75	0,89	11	1221	4
Turnov, kuplov.	CT	3,15	2,45	0,145		3,84	0,91	7	1241	2
Turnov, induk.	CT	3,60	2,32	0,022	0,039	4,19	1,02	3	1278	2
Turnov, kuplov.	CT	3,19	2,49	0,153		3,89	0,93	8	1231	2
Turnov, induk.	CT	3,62	2,34	0,021	0,040	4,22	1,03	2	1254	2
Liberec, induk.	JBFS	3,27	2,74	0,052		3,98	0,96	nehodn.	1334	7
Liberec, induk.	CT	2,85	3,01	0,055		3,63	0,86	nehodn.	1326	5
Liberec, induk.	CT	3,76	2,48	0,028	0,039	4,39	1,08	nehodn.	1257	1
Liberec, induk.	JBFS	3,51	3,85	0,028	0,046	4,49	1,14	nehodn.	1245	1

alku, bílé řádky tavenina LLG, světlemodré řádky tavenina LČG a LKG.

T max (°C)	tL (s)	TL (°C)	ts1 (s)	ts2 (s)	Ts2 (°C)	ts2 - ts1 (s)	delta TE (°C)	podchlazení	t1max (s)	L1max (mm)	t1min (s)	L1min (mm)	t2max (s)	L2m
53	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
74	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
18	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
20	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
18	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
30	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
49	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
58	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
18	průběh	dilatace	nelze	vyhodnotit										
65	15	1214	141	410	1075	269	0	60	0,01	81	0,004	377	0,566	
08	50	1178	152	450	1042	298	9	125	0,124	195	0,016	401	0,272	
92	50	1175	125	430	1062	305	0	122	0,05	170	-0,016	398	0,256	
56	65	1177	183	481	1026	298	0	chybí	první maximum			438	0,503	
87	60	1168	125	430	1073	305	22	chybí	první maximum			397	0,373	
71	25	1193	108	440	1061	332	0	138	0,05	215	-0,041	418	0,21	
95	40	1181	110	405	1062	295	9	chybí	první maximum			385	0,609	
07	15	1220	160	446	1080	286	26	130	0,073	179	0,033	398	0,278	
77	35	1203	116	425	1078	309	0	0	0	28	-0,007	336	0,285	
49	23	1200	141	433	1065	292	4	154	0,085	203	0,031	400	0,563	
81	25	1202	125	466	1048	341	2	154	0,095	194	0,056	435	0,305	
82	16	1217	166	460	1068	294	10	166	0,047	230	-0,051	422	0,404	
68	50	1175	115	460	1062	345	1	138	0,084	194	0,015	442	0,222	
03	45	1185	93	355	1083	262	3	chybí	první maximum			405	0,45	
80	40	1202	208	/	/	/	0	178	0,13	194	0,13	308	0,168	
36	33	1200	188	380	1052	192	0	194	0,103	203	0,103	345	0,159	
35	25	1193	175	380	1055	205	0	162	0,108	186	0,108	345	0,155	
21	16	1202	162	/	/	/	0	150	0,22	178	0,21	280	0,224	
30	30	1195	183	385	1058	202	0	178	0,146	186	0,146	349	0,217	
88	20	1195	145	325	1059	175	2	0	0	24,5	-0,01	333	0,26	
21	40	1205	140	288	1058	148	2	0	0	24,5	-0,012	268	0,207	
41	20	1185	155	352	1055	170	0	73	0,046	117	0,036	317	0,116	
78	20	1195	100	441	1043	341	0	130	0,068	187	0,051	415	0,381	
31	25	1203	175	316	1038	141	1	101	-0,003	125	-0,005	337	0,103	
54	20	1193	66	400	1061	334	16	106	0,027	154	0,01	377	0,355	
34	75	1214	233	450	1067	217	0	122	0,148	130	0,148	365	0,287	
26	55	1235	241	438	1076	197	0	150	0,052	191	0,029	369	0,244	
57	17	1231	88	435	1031	347	0	55	0,043	95	-0,172	217	0,044	
45	15	1228	108	440	1070	332	0	112	0,061	185	-0,087	388	0,171	

odchlá	t1max (s	L1max (	t1min (s	L1min (m	t2max (s	L2max (	T2max	L1max (m	L2max (m	
60	0,01	81	0,004	377	0,566	1093	0,006	0,562		0,0
125	0,124	195	0,016	401	0,272	1082	0,108	0,256		0,00
122	0,05	170	-0,016	398	0,256	1090	0,066	0,272		0,00
chybí	první maximum			438	0,503	1051	0	0,503		0,00
chybí	první maximum			397	0,373	1095	0	0,373		0,00
138	0,05	215	-0,041	418	0,21	1075	0,091	0,251		0,00
chybí	první maximum			385	0,609	1096	0	0,609		0,00
130	0,073	179	0,033	398	0,278	1094	0,04	0,245		0,00
0	0	28	-0,007	336	0,285	1131	0,007	0,292		0,00
154	0,085	203	0,031	400	0,563	1085	0,054	0,532		0,00
154	0,095	194	0,056	435	0,305	1075	0,039	0,249		0,00
166	0,047	230	-0,051	422	0,404	1090	0,098	0,455		0,00
138	0,084	194	0,015	442	0,222	1080	0,069	0,207		0,00
chybí	první maximum			405	0,45	1050	0	0,45		0,00
178	0,13	194	0,13	308	0,168	950	0	0,038		0,00
194	0,103	203	0,103	345	0,159	1075	0	0,056		0,00
162	0,108	186	0,108	345	0,155	1070	0	0,047		0,00
150	0,22	178	0,21	280	0,224	1085	0,01	0,014		0,00
178	0,146	186	0,146	349	0,217	1080	0	0,071		0,00
0	0	24,5	-0,01	333	0,26	1068	0,01	0,27		0,00
0	0	24,5	-0,012	268	0,207	1075	0,012	0,219		0,00
73	0,046	117	0,036	317	0,116	1062	0,01	0,08		0,00
130	0,068	187	0,051	415	0,381	1067	0,017	0,33		0,00
101	-0,003	125	-0,005	337	0,103	1070	0,002	0,108		0,00
106	0,027	154	0,01	377	0,355	1085	0,017	0,345		0,00
122	0,148	130	0,148	365	0,287	1127	0	0,139		0,00
150	0,052	191	0,029	369	0,244	1126	0,023	0,215		0,00
55	0,043	95	-0,172	217	0,044	1134	0,215	0,216		0,00
12	0,061	185	-0,087	388	0,171	1117	0,148	0,258		0,00

pořadové číslo zkoušky	Druh litiny a její sekundární metalurgické úpravy	Slévárna, tav.agregát	
39	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	kok
40	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	kok
41	LLG - očkovaná 1% RANKO	TU Liberec, induk.	kok
42	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	kok
43	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	kok
44	LLG - očkovaná 1% RANKO	TU Liberec, induk.	kol
45	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	kol
46	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	kol
47	LLG - očkovaná 1% RANKO	TU Liberec, induk.	kol
48	LKG - mod.FeSiMg 1,2%+očk.Superseed 0,4% FeSi75 0,2%	TU Liberec, induk.	kol
49	LLG - očkovaná 0,5% RANKO	TU Liberec, induk.	
50	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	
51	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	
52	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	
53	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	
54	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	
55	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	
56	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	
57	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	
58	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	
59	LLG - očkovaná 1% Superseed	TU Liberec, induk.	
60	LLG - neupravovaná tavenina	TU Liberec, induk.	
61	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75	ČKD HK, kuplovna	
62	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75 + 0,05% Sb	Rumburk, plyn.rotač.	
63	LLG - neupravovaná tavenina	SL ŠKODA, induk.	
64	LLG - očkovaná 0,1% LMC	SL ŠKODA, induk.	
65	LLG - očkovaná 0,3% LMC	SL ŠKODA, induk.	
66	LLG - očkovaná 0,3% Superseed	SL ŠKODA, induk.	
67	LLG - očkovaná 0,3% RANKO	SL ŠKODA, induk.	
68	LLG - očkovaná 0,3% LMC + legovaná 0,02% CuSb	SL ŠKODA, induk.	
69	LLG - očkovaná 0,3% LMC + legovaná 0,08% CuSb	SL ŠKODA, induk.	
70	LLG - neočkováno + legovaná 0,06% CuSb	SL ŠKODA, induk.	
71	LLG - očkovaná 0,15% LMC + 0,15% Superssed	SL ŠKODA, induk.	
72	LLG + P + očkováná 0,3% LMC	SL ŠKODA, induk.	

Tabulka č. 24-B Přehled výsledků dilatačních zkoušek na zkušebním odlitku *válcového špalku*, bílé

egát	Druh formy	%C	%Si	%P	%Mg	CE (%)	Sc	zákalková zk. (mm)	Tmax změř. (°C	tL(s)	T
	kokila 200°C	3,43	2,53	0,026		4,08	0,99	nehodn.	1322	průběh	di
	kokila 200°C	3,17	3,06	0,026		3,95	0,96	nehodn.	1330	průběh	di
	kokila 200°C	3,03	2,67	0,027		3,71	0,89	nehodn.	1308	18	1212
	kokila 200°C	3,34	2,60	0,037		4,01	0,97	nehodn.	1343	38	1182
	kokila 200°C	3,03	3,37	0,037		3,89	0,94	nehodn.	1282	21	1165
	kokila 200°C	3,34	2,64	0,038		4,02	0,97	nehodn.	1278	20	1185
	kokila 400°C	3,31	2,61	0,066		4,00	0,97	nehodn.	1360	28	1180
	kokila 400°C	3,12	3,14	0,063		3,94	0,95	nehodn.	1380	31	1188
	kokila 400°C	3,35	2,64	0,066		4,04	0,98	nehodn.	1369	38	1185
	kokila 400°C	3,75	2,65	0,024	0,03	4,42	1,09	nehodn.	1360	35	1152
	CT	3,13	1,80	0,336		3,75	0,87	nehodn.	1332	83	1203
	CT	3,22	2,82	0,052		3,95	0,96	nehodn.	1301	57	1168
	CT	3,24	2,61	0,046		3,92	0,94	nehodn.	1267	32	1197
	CT	2,34	2,14	0,033		2,89	0,65	nehodn.	1383	průběh	dila
	CT	3,32	2,22	0,101		3,93	0,94	nehodn.	1328	průběh	dila
	CT	3,07	2,55	0,102		3,76	0,89	nehodn.	1384	116	1208
	CT	3,01	2,01	0,104		3,56	0,84	nehodn.	1377	98	1238
	CT	2,85	2,08	0,106		3,42	0,80	nehodn.	1310	45	1250
	CT	3,03	1,90	0,091		3,55	0,83	nehodn.	1369	52	1246
	CT	2,88	2,39	0,091		3,52	0,83	nehodn.	1384	77	1227
	CT	2,72	2,52	0,092		3,40	0,79	nehodn.	1357	průběh	dilat
	CT	2,71	2,06	0,093		3,27	0,76	nehodn.	1365	58	1263
	CT	3,28	1,29	0,118		3,66	0,86	nehodn.	1222	62	1200
	CT	3,17	1,73	0,278		3,74	0,87	nehodn.	1211	51	1175
	CT	3,42	1,82	0,041		3,90	0,93	12	1282	65	1262
	CT	3,38	1,85	0,039		3,86	0,92	8	1234	34	1200
	CT	3,24	2,05	0,037		3,77	0,90	6	1228	29	1195
	CT	3,22	1,99	0,038		3,74	0,89	4	1237	22	1218
	CT	3,35	1,91	0,041		3,85	0,92	12	1246	34	1203
	CT	3,30	2,05	0,038		3,83	0,92	4	1262	41	1199
	CT	3,32	1,96	0,039		3,83	0,91	5	1250	36	1201
	CT	3,30	1,84	0,039		3,78	0,90	13	1232	24	1215
	CT	3,27	1,95	0,038		3,78	0,90	2	1241	26	1217
	CT	3,12	1,87	0,724		3,95	0,90	3	1251	46	1191

ílé řádky tavenina LLG, sv.modré řádky tavenina LČG a LKG.

L (°C)	ts1 (s)	ts2(s)	Ts2(°C)	ts2 - ts1 (s)	deltaTE(°C)	t1max (s)	L1max(mm)	t1min (s)	L1min (mm)	t2max (s)	L2max (mm)	T2max (°C)	L1
atace	nelze	vyhodnotit											
atace	nelze	vyhodnotit											
48	100	1010	52	1	chybí první maximum				18	0,028	1212	nelze v	
45	100	1048	55	0	chybí první maximum				57	0,101	1151	nelze v	
35	75	1042	40	0	chybí první maximum				32	0,044	1152	nelze v	
38	70	1072	32	0	chybí první maximum				35	0,118	1135	nelze v	
44	117	1038	73	1	chybí první maximum				70	0,061	1125	nelze v	
45	95	1072	50	0	chybí první maximum				65	0,091	1139	nelze v	
55	118	1082	63	1	chybí první maximum				57	0,107	1157	nelze v	
40	125	1022	85	2	chybí první maximum				112	0,165	1068	nelze v	
260	470	1073	210	0	178	0,077	235	0,045	422	0,222	1110	0,032	
210	375	1047	165	0	27	0,0069	76	-0,015	338	0,1968	1075	0,021	
170	354	1060	184	1	13	-0,0067	94	-0,128	329	0,258	1084	0,120	
atace	nelze	vyhodnotit											
atace	nelze	vyhodnotit											
320	515	1107	195	1	258	0,097	265	0,096	474	0,267	1140	0,001	
410	574	1088	164	3	252	0,041	327	0,016	550	0,062	1102	0,025	
330	503	1071	173	3	166	0,046	275	-0,028	483	0,065	1093	0,074	
285	449	1065	164	3	62	0,022	257	-0,078	432	0,095	1084	0,1	
300	469	1063	169	0	235	-0,035	256	-0,041	443	0,203	1088	0,00	
latace	nelze	vyhodnotit											
342	490	1048	148	0	173	-0,078	281	-0,099	407	-0,074	1082	0,02	
151	284	1062	133	0	41	0,0004	115	-0,164	212	-0,094	1106	0,164	
140	255	1061	115	0	0	0	83	-0,021	235	0,104	1074	0,02	
175	354	1225	179	2	16	0,02	140	-0,157	326	0,313	1168	0,17	
195	376	1039	181	0	11	0,002	155	-0,052	359	0,021	1060	0,05	
200	409	1047	209	0	78	0,023	187	-0,062	395	0,305	1062	0,08	
192	391	1068	199	0	76	0,005	172	-0,096	379	0,251	1087	0,10	
233	418	1055	185	0	18	0,002	185	-0,166	397	0,071	1079	0,16	
260	443	1060	183	0	139	0,022	215	-0,009	438	0,391	1068	0,03	
215	422	1055	207	0	70	0,174	196	0,109	409	0,486	1074	0,06	
220	391	1072	171	0	43	0,134	187	0,041	379	0,393	1091	0,09	
212	397	1071	185	0	24	0,036	172	-0,104	299	-0,079	1128	0,14	
210	385	1062	175	0	110	0,029	188	0,015	379	0,109	1067	0,01	

m)	T2max (°C)	L1max -L1min (mm)	L2max -L1min (mm)	tangenta úhlu alfa (mm/s)	Eut. buňky v ose zk. odl. (EB/cm2)	velikost grafitu v ose zk. odlitku	rozložení grafitu v ose zk. odlitku	% globulárního gr. v ose zk. odl.	relativní ry zv
					90	8	E		0,839
					350	8	D		0,753
2	nelze vyhodnotit		0,0012	240	7(6)	D(A)			0,792
1	nelze vyhodnotit		0,0021	50	8	D			0,813
2	nelze vyhodnotit		0,0018	420	7	D			0,735
5	nelze vyhodnotit		0,0042	210	7	D			0,772
5	nelze vyhodnotit		0,0027	20	8	E			0,876
9	nelze vyhodnotit		0,0023	280	5(6)	B(D)			0,719
7	nelze vyhodnotit		0,0015	240	7	D			0,684
3	nelze vyhodnotit		0,0019	120	7/8			80	0,97
0	0,032	0,177	0,0018	110	4	C			0,802
5	0,0218	0,2117	0,0021	80	4(6)	B(D)			0,841
4	0,1208	0,3855	0,0042	60	8	E			0,743
				40	9/8	D			0,708
				70	5	A(D)			0,742
0	0,001	0,171	0,0015	70	5(6)	A(D)			0,897
2	0,025	0,046	0,0005	50	8/7	D			0,906
3	0,074	0,093	0,001	50	8(7)	D			0,866
4	0,1	0,173	0,0021	40	8/6	D			0,875
3	0,006	0,244	0,0022	70	5/4	A			0,725
				70	4	A			0,746
2	0,021	0,025	0,0005	50	9	D			0,595
6	0,1644	0,07	0,0018	60	5/8	B(D)			0,828
4	0,021	0,125	0,0013	150	8(7)	D			0,723
3	0,177	0,47	0,0044	80	4(8)	B(A)			0,748
0	0,054	0,073	0,0014	60	5/7	D			0,745
2	0,085	0,367	0,0035	90	5(3)	D(B)			0,749
7	0,101	0,347	0,0033	80	5	A			0,754
	0,168	0,237	0,0021	60	5	D(A)			0,738
	0,031	0,4	0,0029	90	4	A			0,723
	0,065	0,377	0,0035	100	4/7	D			0,757
	0,093	0,352	0,0034	70	5	A			0,776
	0,14	0,025	0,0003	110	4(8)	A(D)			0,743
	0,014	0,094	0,0008	130	4/5	A			0,746

Pořadové číslo zkoušky	Druh litiny a její sekundární metalurgické úpravy
73	LČG - neupravovaná tavenina
74	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,5%SUPER.+ leg.0,02%CuSb 0,02%Cu
75	LČG - modifikovaná 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 - neočkovaná
76	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,5%SUPER.0,5%RANKO + leg.0,015%Cu
77	LČG - modif. 1% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,5%SUPER.0,3%LMC+ leg.0,015%CuSb
78	LKG - modif. 1,2% FeSiMg 0,4%FeSi75 + očk.0,6%SUPER.+ leg.0,015%CuSb 0,035%
79	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75 + 0,05% Sb
80	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75 + 0,05% Sb
81	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75 + 0,05% Sb
82	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75 + 0,05% Sb
83	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75 + 0,05% Sb
84	LLG - očkovaná 0,3% FeSi75 + 0,05% Sb

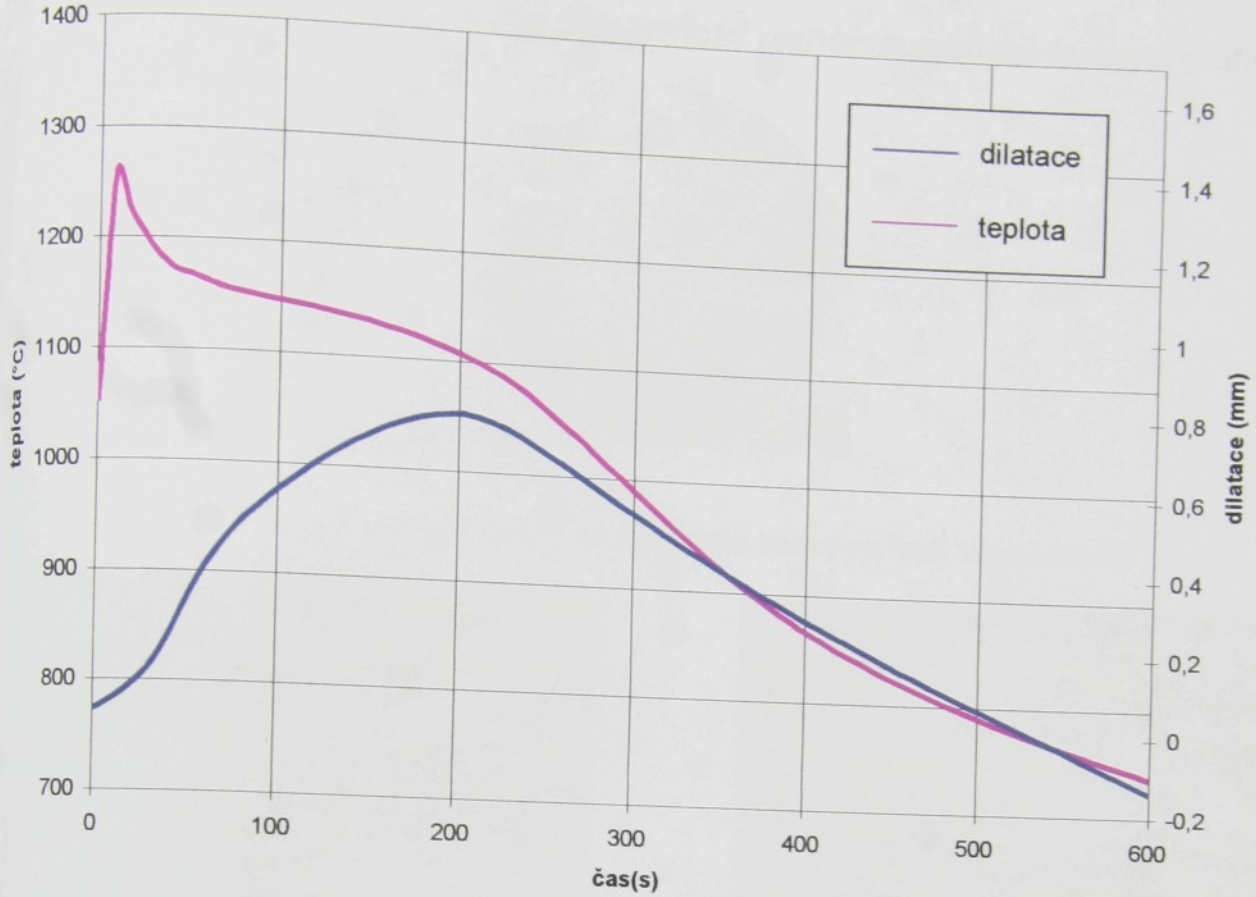
Tabulka č. 24-C Přehled výsledků dilatačních zkoušek na zkušebním odlitku *válcového špalíku*

Slévárna, tav.agregát	Druh formy	%C	%Si	%P	%Mg	CE (%)	S	rozložení gra	
SL ŠKODA, induk.	CT	3,84	1,59	0,025	0	4,25	1,03	A/D	
SL ŠKODA, induk.	CT	3,62	2,78	0,025	0,021	4,33	1,07		
SL ŠKODA, induk.	CT	3,71	2,36	0,024	0,02	4,31	1,06		
SL ŠKODA, induk.	CT	3,64	2,61	0,025	0,014	4,31	1,06		
SL ŠKODA, induk.	CT	3,61	2,96	0,022	0,015	4,36	1,08		
Rumburk, plyn.rotační	CT	3,56	3,04	0,021	0,028	4,33	1,07		
Rumburk, plyn.rotační	CT	2,93	1,63	0,248		3,46	0,80	D	
Rumburk, plyn.rotační	CT	3,11	1,64	0,455		3,75	0,86	D(B)	
Rumburk, plyn.rotační	CT	3,03	1,69	0,267		3,59	0,83	D	
Rumburk, plyn.rotační	CT	3,12	1,62	0,233		3,64	0,85	A(D)	
Rumburk, plyn.rotační	CT	3,17	1,62	0,276		3,71	0,87	D(A)	
Rumburk, plyn.rotační	CT	3,10	1,51	0,248		3,60	0,84	B(D)	

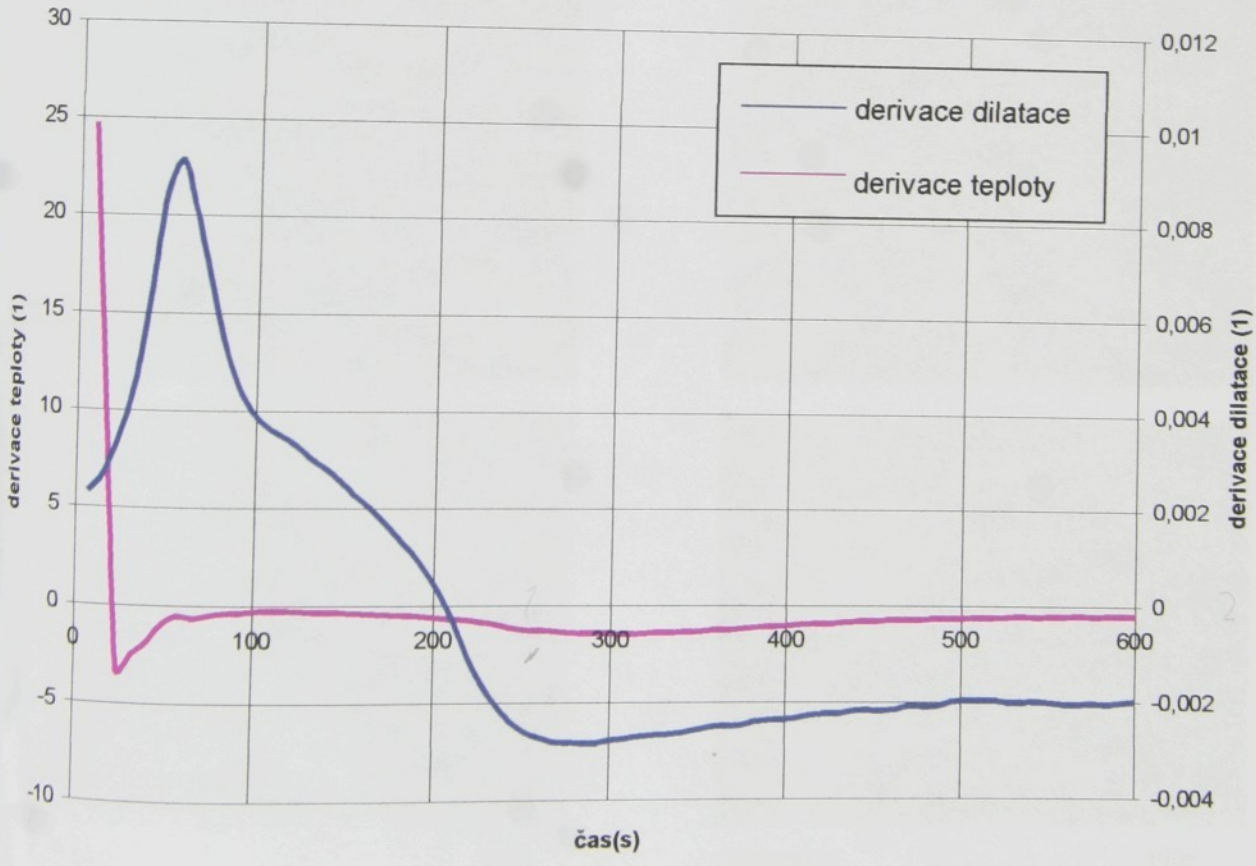
, bílé řádky tavenina LLG, sv.modré řádky tavenina LČG a LKG.

zákalková zk. (mm)	Tmax změřená (°C)	tL(s)	TL (°C)	ts1 (s)	tS2(s)	Ts2(°C)	ts2 - ts1 (s)	delta TE (°C)	t1max (s)	L1max (mm)	t1min (s)	L1min (m
13	1367	149	1141	285	562	1054	277	0	190	-0,009	206	-0,01	55
10	1265	74	1147	110	448	1060	338	3	101	-0,033	163	-0,071	42
30	1312	108	1150	217	504	1038	287	8	182	-0,018	252	-0,095	50
25	1206	40	1137	70	424	1042	354	0	0	0	176	-0,231	40
5	1293	100	1149	160	504	1046	344	0	158	-0,061	244	-0,088	48
15	1273	96	1129	138	481	1022	343	2	76	-0,057	218	-0,236	43
nehodn.	1240	88	1182	210	340	1056	130	0	47	0,004	175	-0,196	31
nehodn.	1226	31	1203	215	369	1047	154	0	121	-0,031	164	-0,039	32
nehodn.	1220	61	1186	170	293	1065	123	0	0	0	121	-0,051	28
nehodn.	1230	58	1203	160	290	1094	130	1	52	-0,006	110	-0,031	26
nehodn.	1224	průběh dilatace nelze vyhodnotit											
nehodn.	1221	51	1193	185	344	1053	154	0	23	0,024	152	-0,151	32

L2max (mm)	T2max (°C)	L1max-L1min (mm)	L2max-L1min (mm)	tangenta úhlu alfa (mm/s)	Eutektické buňky v ose zk. odlitku (EB/cm2)	velikost grafitu v ose zkušebního odlitku	rozložení grafitu v ose zkušebního odlitku	% globulárního grafitu v ose zk. odlitku	relativ
1071	0,001	0,413	0,0031	40	4/7	A/D		0,681	
1081	0,038	0,235	0,0019	130	6(7)		70	0,895	
1035	0,077	0,336	0,0032	90	5/6		20	0,897	
1061	0,231	0,402	0,0027	170	6/7		90	0,935	
1072	0,027	0,259	0,0024	150	6(7)		50	0,901	
1052	0,179	0,248	0,0017	70	6/5		20	0,908	
1079	0,2	0,119	0,0016	160	5	D		0,827	
1080	0,008	0,098	0,0014	90	6/7	D(B)		0,826	
1072	0,051	0,094	0,0009	210	5/6	D		0,792	
1121	0,025	0,109	0,0015	180	4(5)	A(D)		0,789	
				60	5(4)	D(A)		0,794	
1074	0,175	0,125	0,0015	70	4/3	B(D)		0,785	

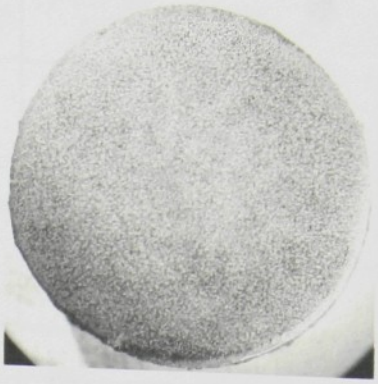


Obr. č. 147 Časový průběh teploty a dilatace, zkouška č. T 1 (LLG)



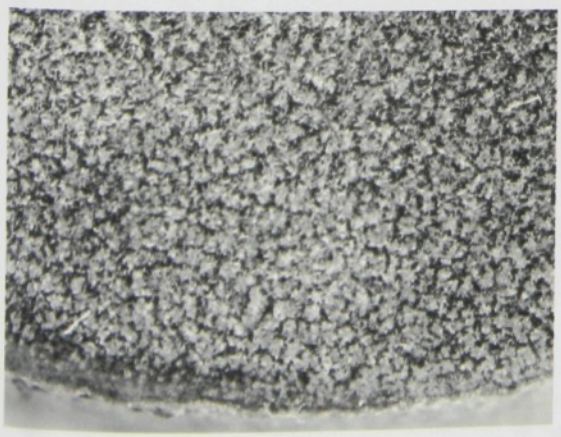
Obr. č. 148 Derivace průběhu teploty a dilatace, zkouška č. T 1 (LLG)

Válcová tyč – zkouška č.T 1,metalografický rozbor: eutektické buňky a grafit



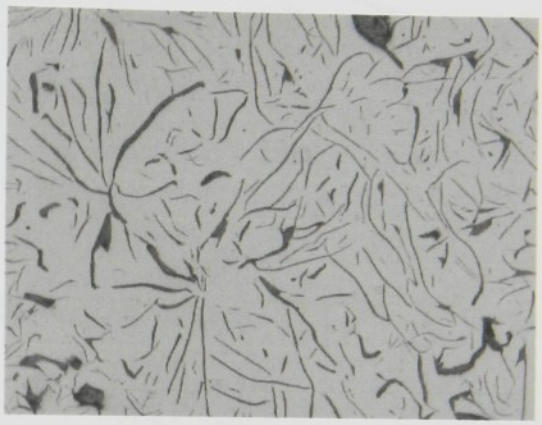
STEAD 2 2x

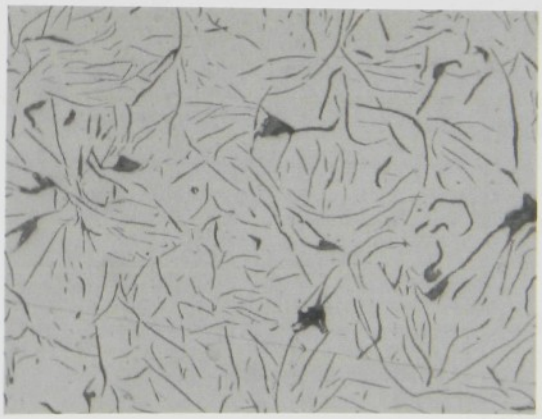
Obr.č. 149 celkový pohled na eutektické buňky na řezu válcové tyče

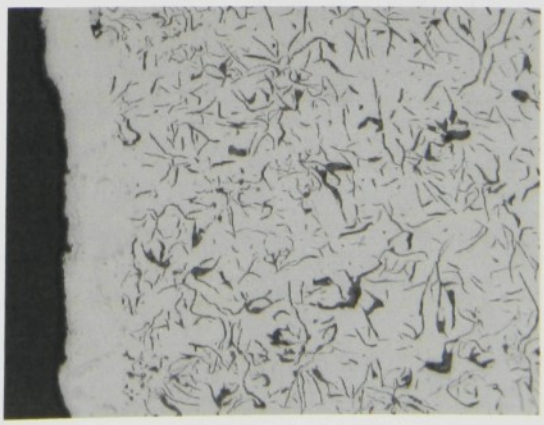


STEAD 2 20x

Obr.č.150 eutektické buňky na řezu válcové tyče, vzestupně: kraj,stěna, osa

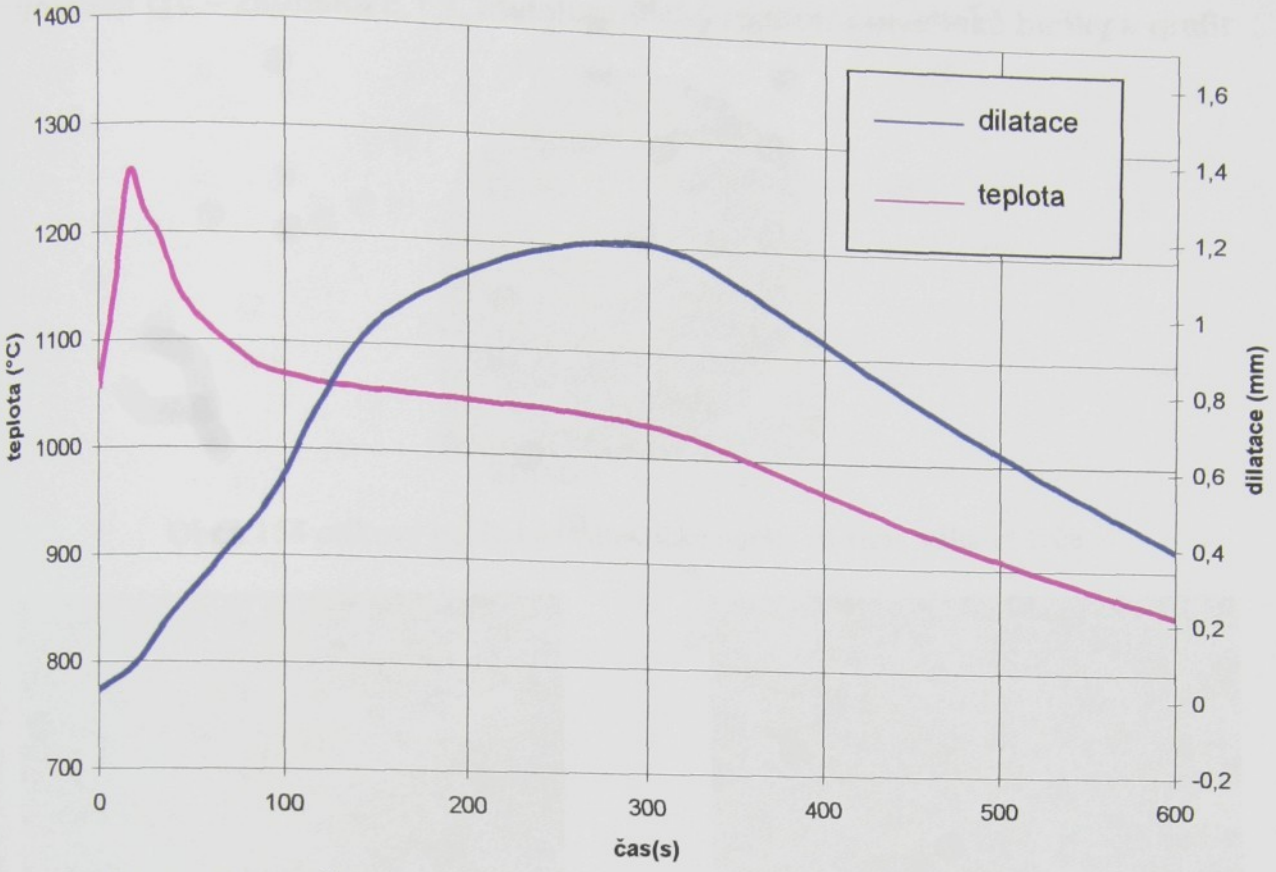




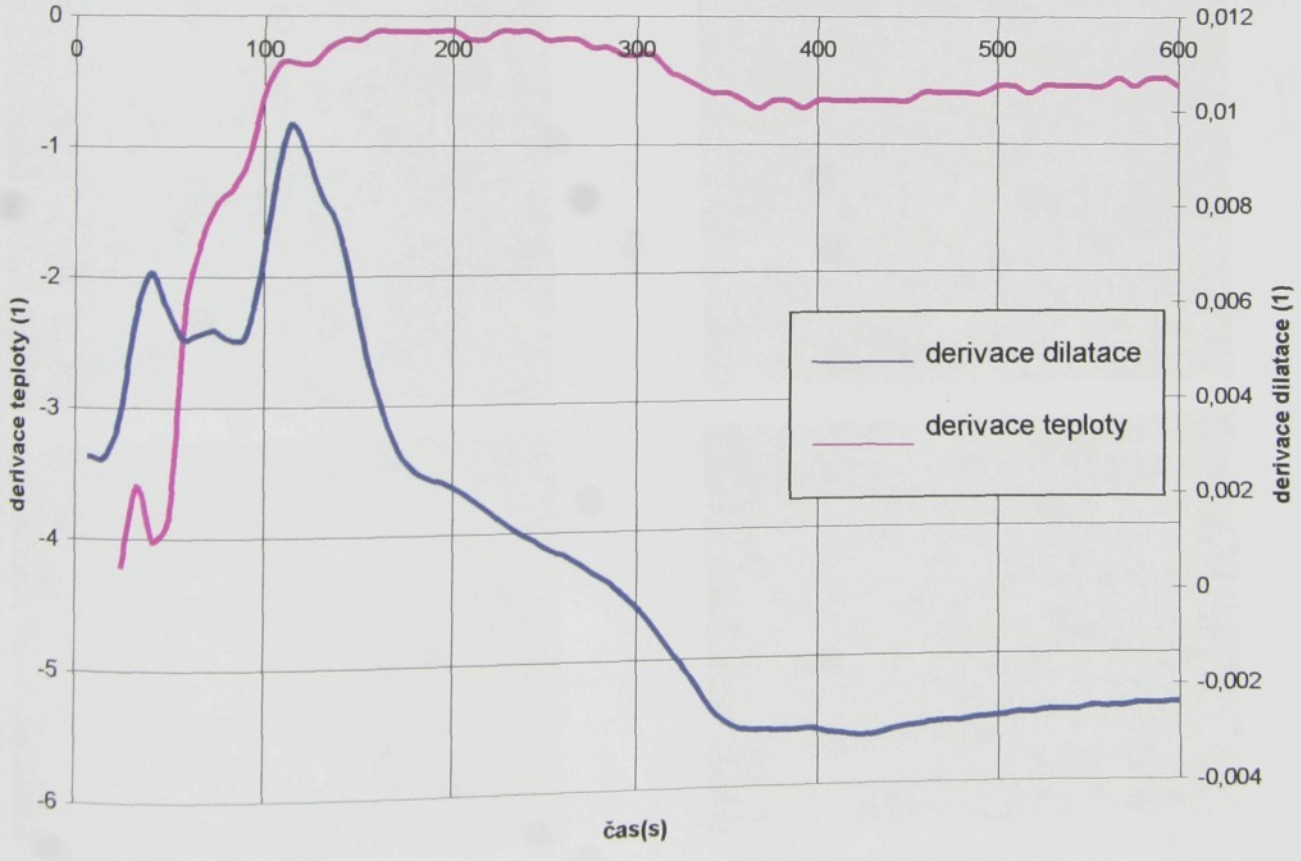


Neleptáno 100x

Obr.č.151 grafit na metalografickém výbrusu tyče, vzestupně: kraj,stěna, osa

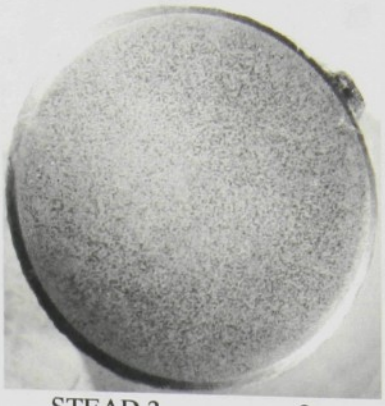


Obr. č. 152 Časový průběh teploty a dilatace, zkouška č. T 7 (LKG)



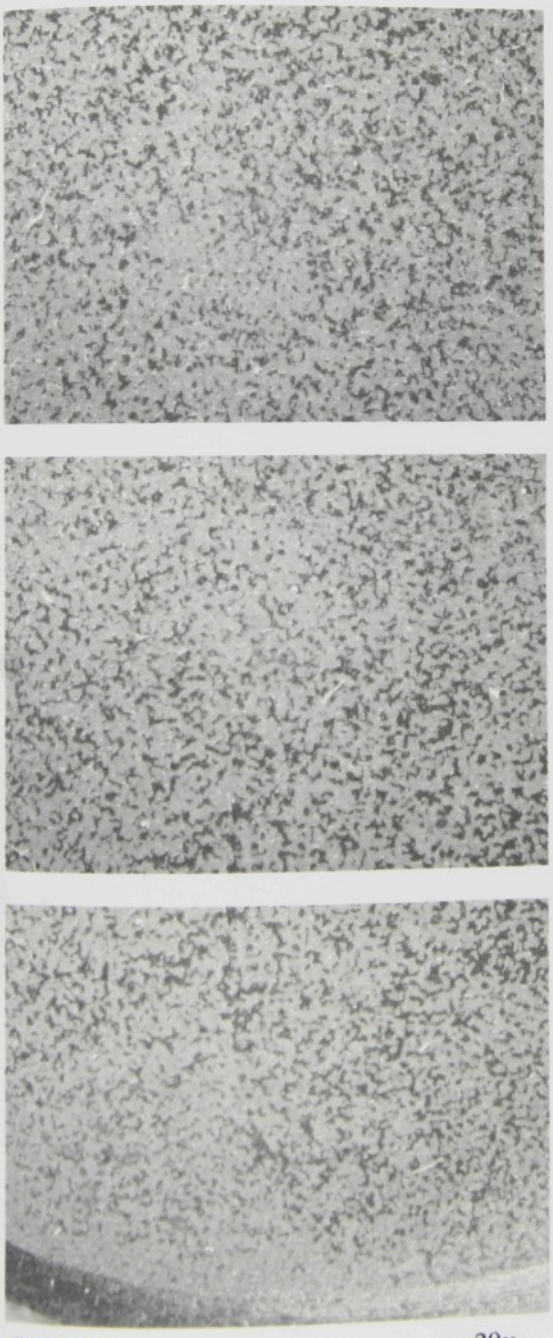
Obr. č. 153 Derivace průběhu teploty a dilatace, zkouška č. T 7 (LLG)

Válcová tyč – zkouška č.T 7, metalografický rozbor: eutektické buňky a grafit



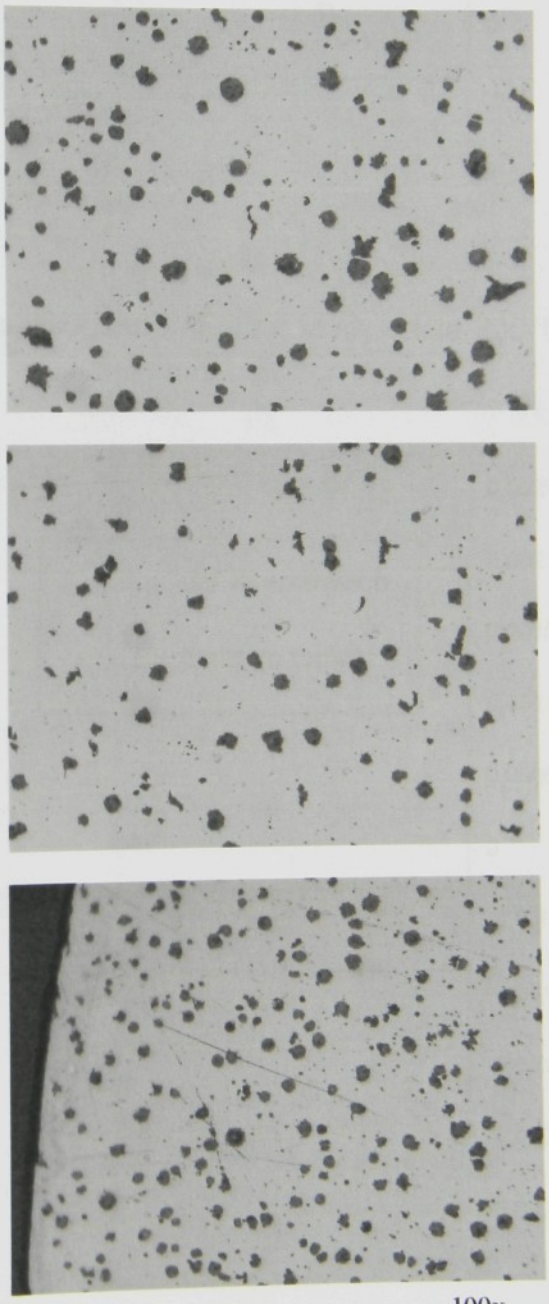
STEAD 2 2x

Obr.č.154 celkový pohled na eutektické buňky na řezu válcové tyče



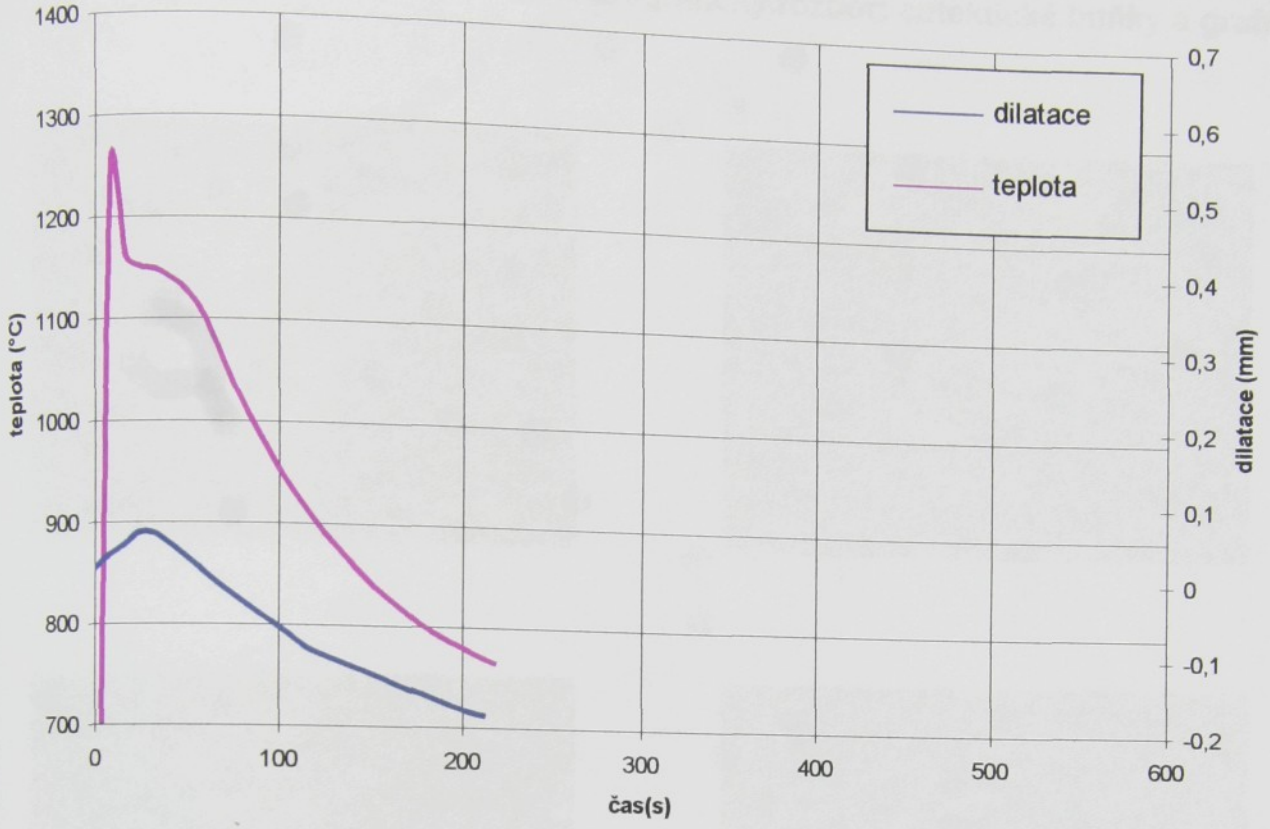
STEAD 2 20x

Obr.č.155 eutektické buňky na řezu válcové tyče, vzestupně: kraj,stěna, osa

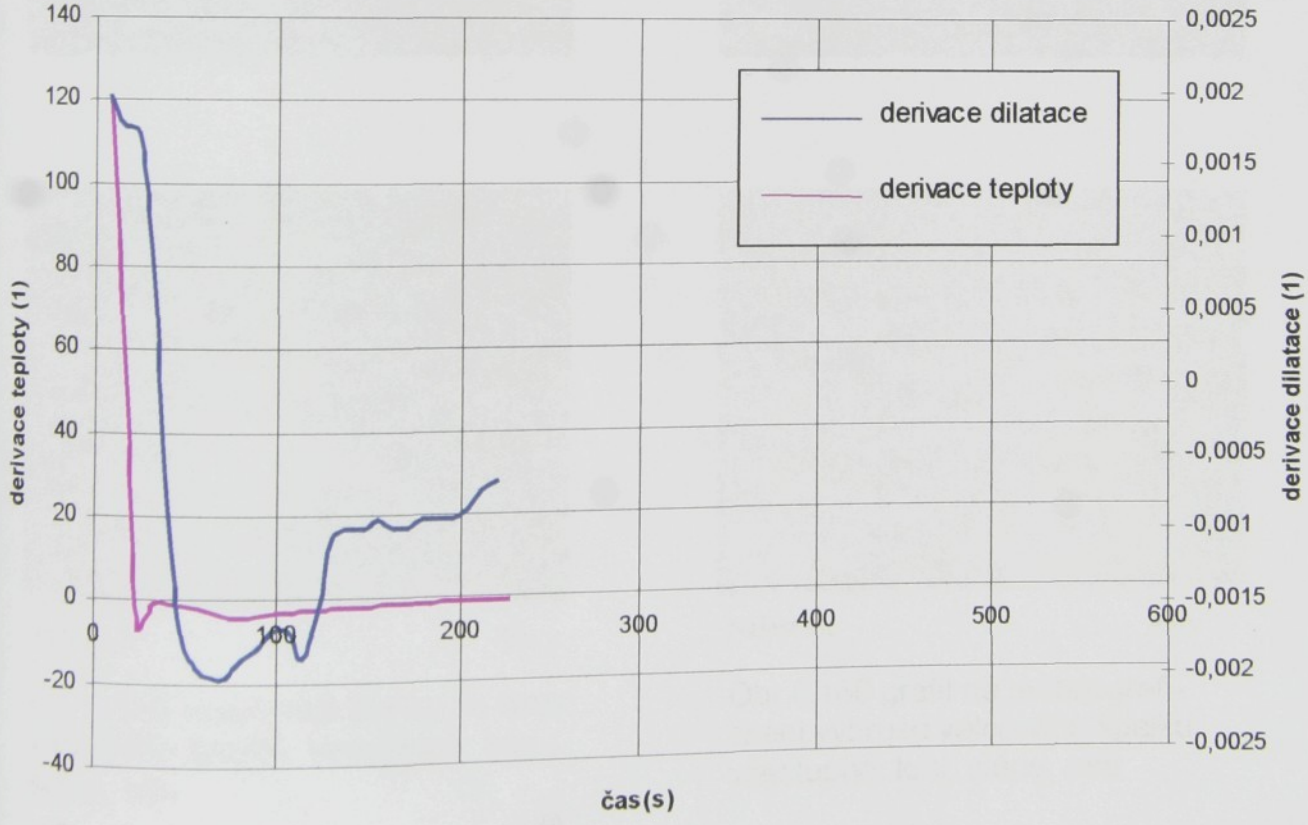


Neleptáno 100x

Obr.č.156 grafit na metalografickém výbrusu tyče, vzestupně: kraj,stěna, osa

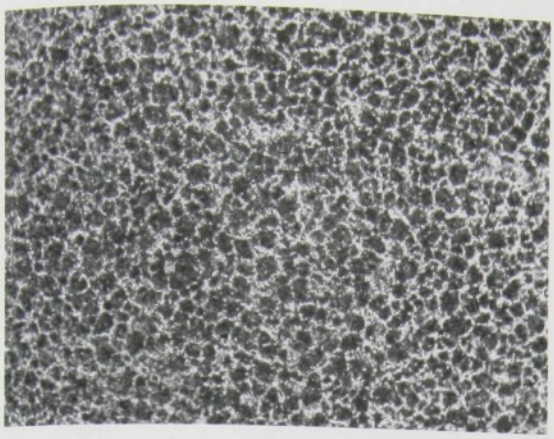


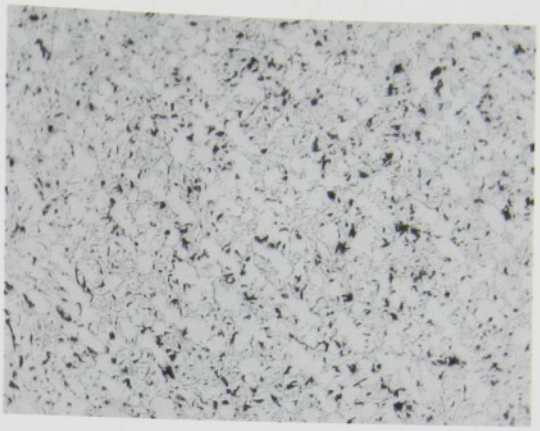
Obr. č. 157 Časový průběh teploty a dilatace, zkouška č. Š 43 (LLG, kokila 200°C)

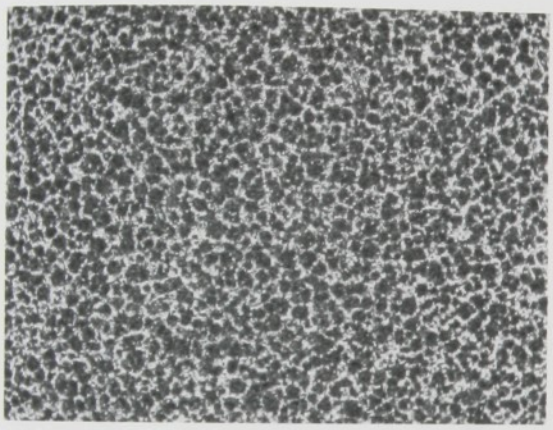


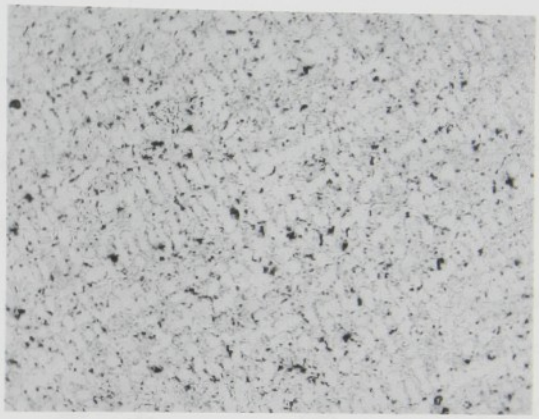
Obr. č. 158 Derivace průběhu teploty a dilatace, zkouška č. Š 43 (LLG, kokila 200°C)

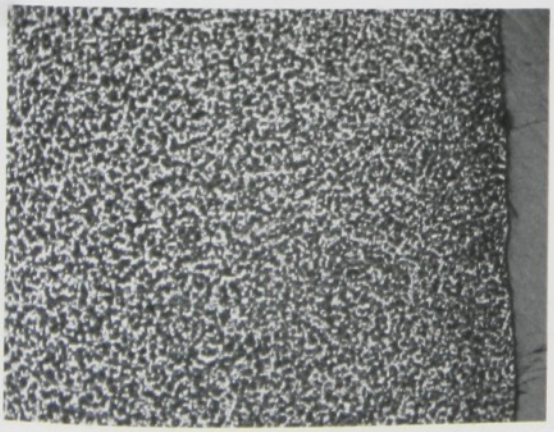
Válcový špalek – zkouška č.Š 43, metalografický rozbor: eutektické buňky a grafit









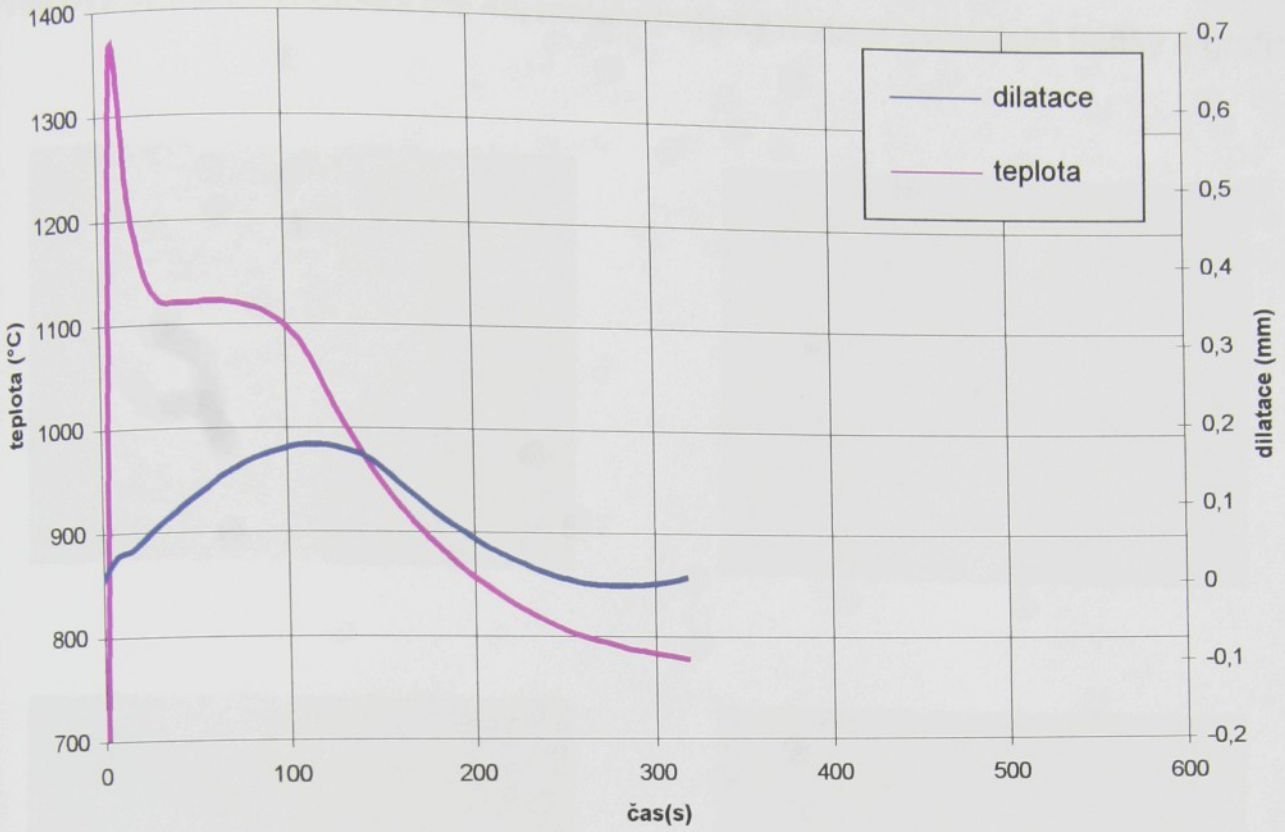


STEAD 2 20x

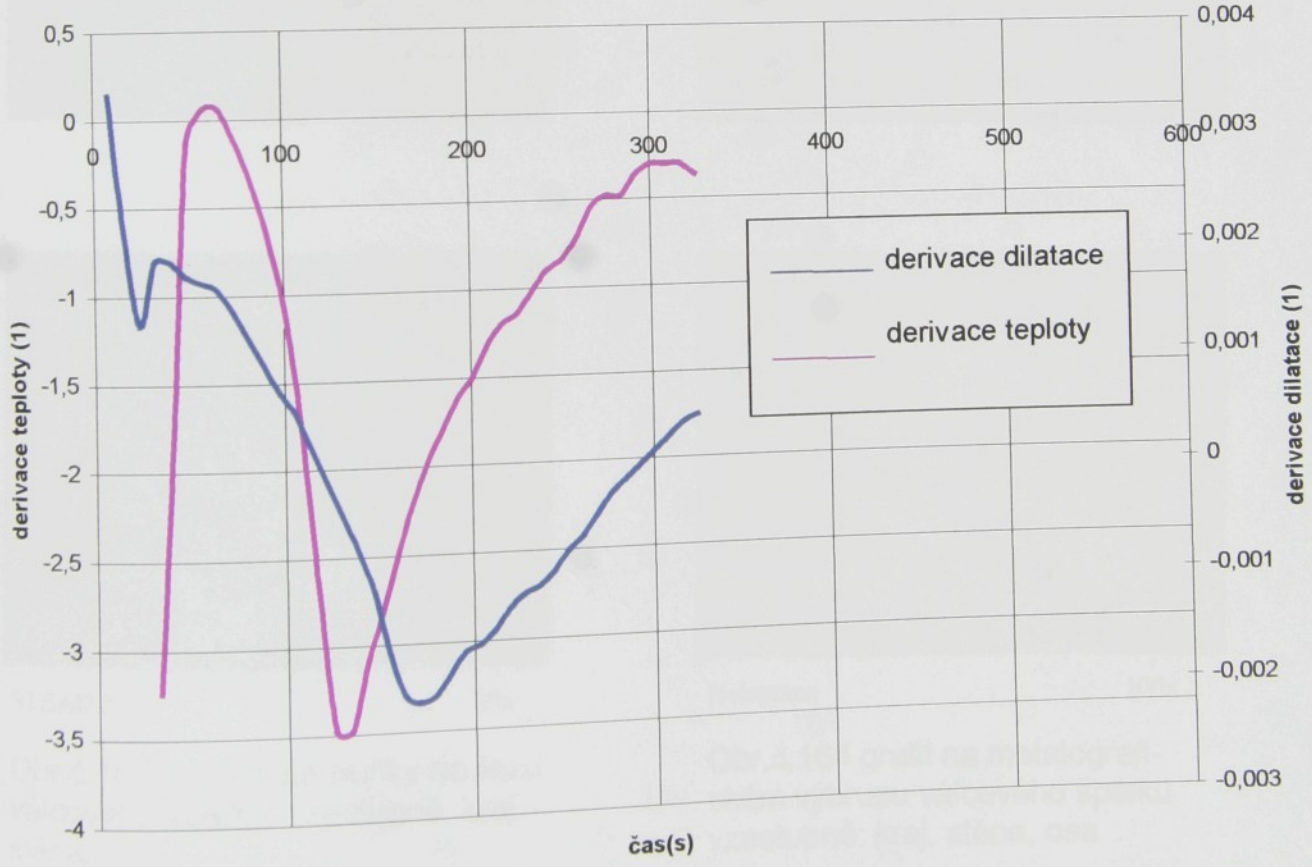
Obr.č.159 eutektické buňky na řezu válcového špalku, vzestupně: kraj, stěna, osa

Neleptáno 100x

Obr.č.160 grafit na metalografickém výbrusu válcového špalku vzestupně: kraj, stěna, osa

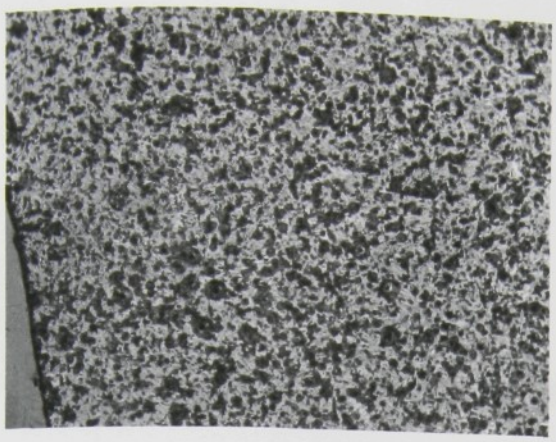


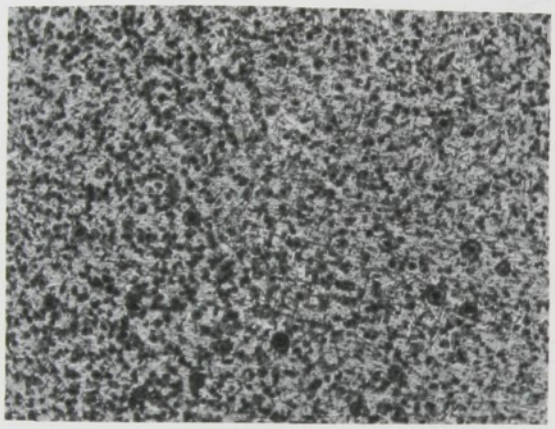
Obr. č. 161 Časový průběh teploty a dilatace, zkouška č. Š 48 (LKG, kokila 400°C)



Obr. č. 162 Derivace průběhu teploty a dilatace, zkouška č. Š 48 (LKG, kokila 400°C)

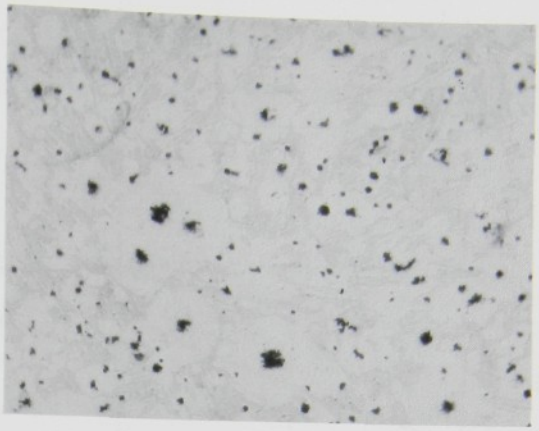
Válcový špalek – zkouška č.Š 48, metalografický rozbor: eutektické buňky a grafit

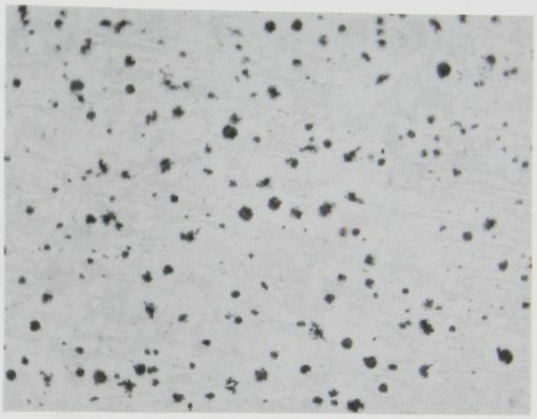


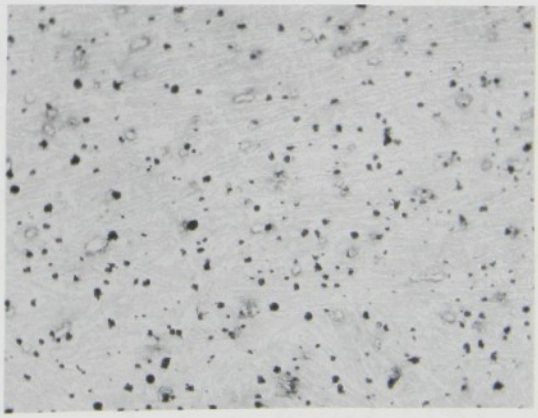


STEAD 2 20x

Obr.č.163 eutektické buňky na řezu válcového špalku, vzestupně: kraj, stěna, osa

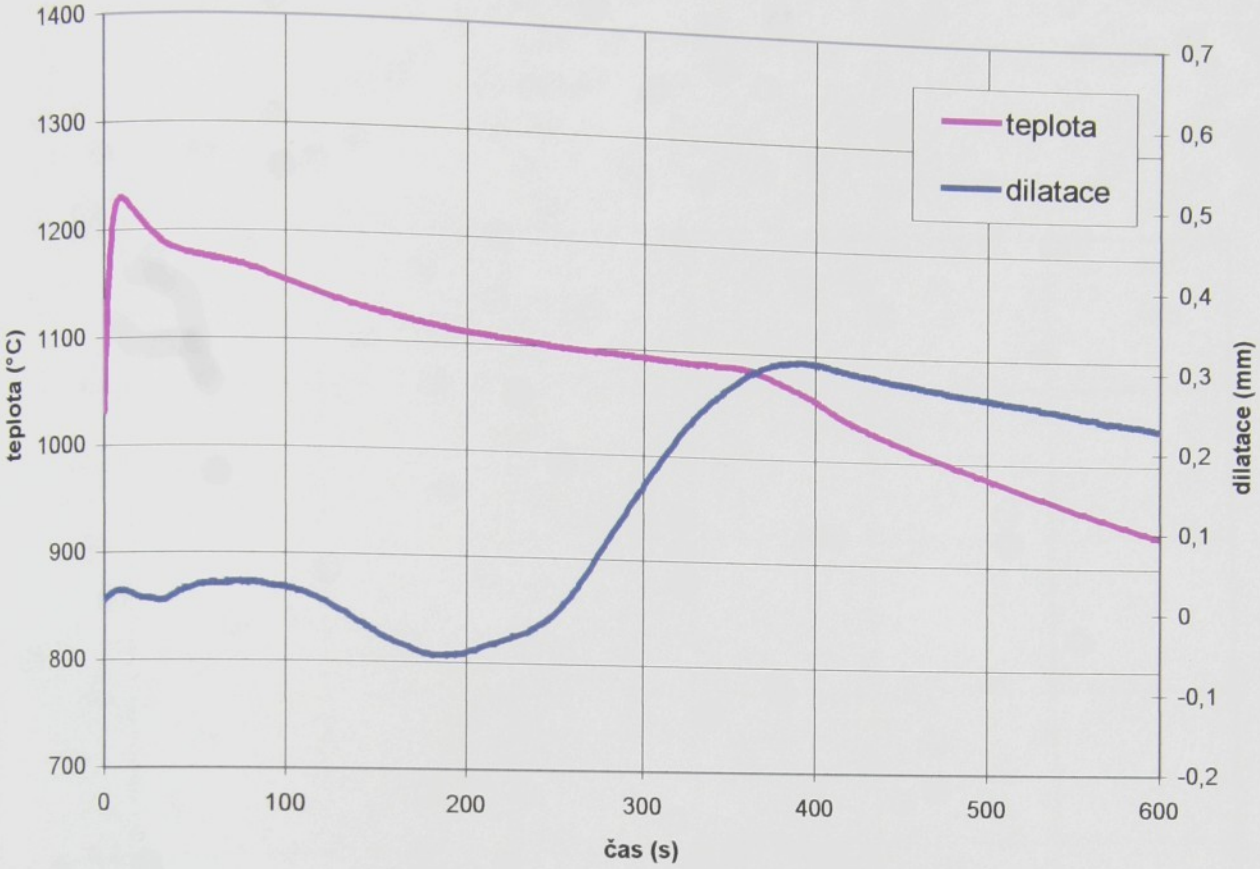




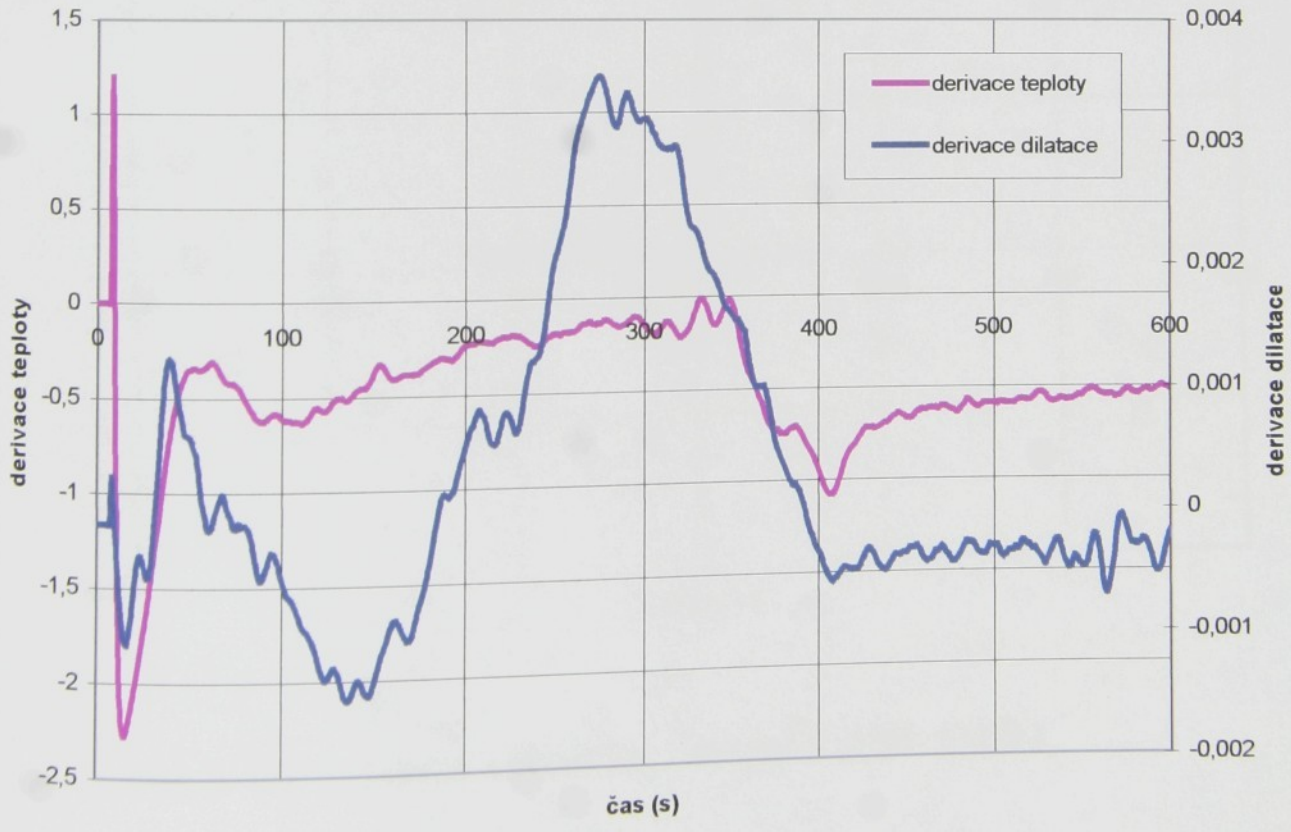


Neleptáno 100x

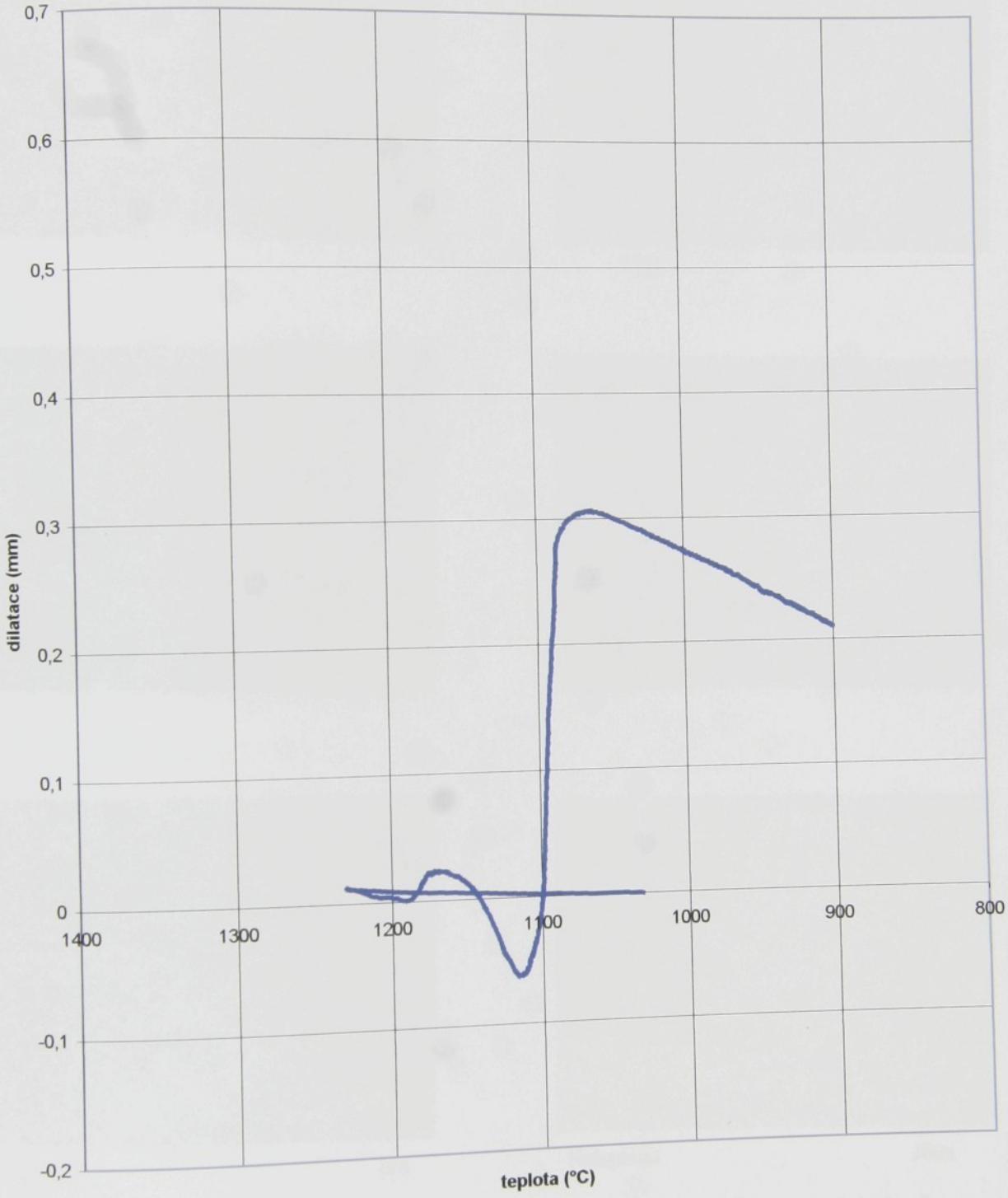
Obr.č.164 grafit na metalografickém výbrusu válcového špalku vzestupně: kraj, stěna, osa



Obr. č. 165 Časový průběh teploty a dilatace, zkouška č. Š 65 (LLG)

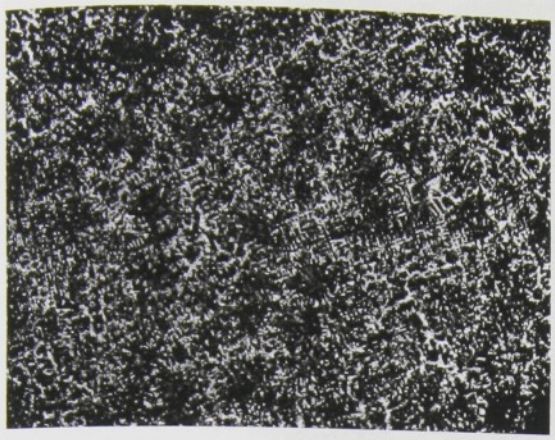


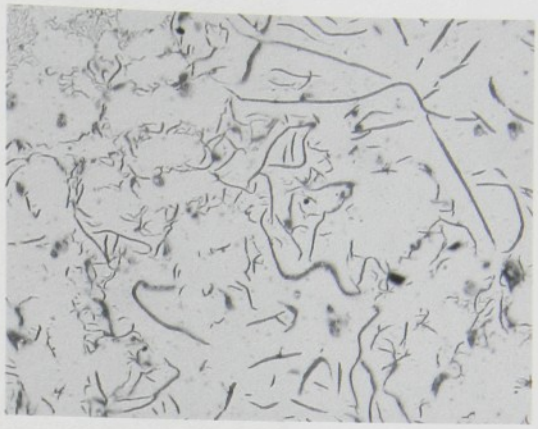
Obr. č. 166 Derivace průběhu teploty a dilatace, zkouška č. Š 65 (LLG)

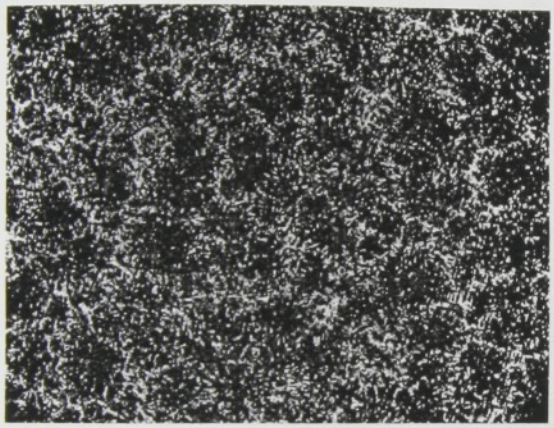


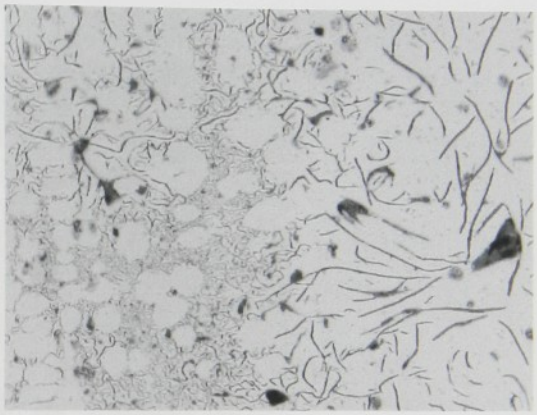
Obr. č. 167 Dilatace = f(teplota), zkouška č. Š 65 (LLG)

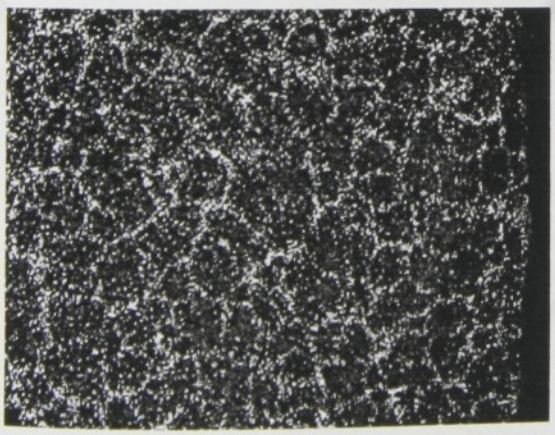
Válcový špalek – zkouška č.Š 65, metalografický rozbor: eutektické buňky a grafit









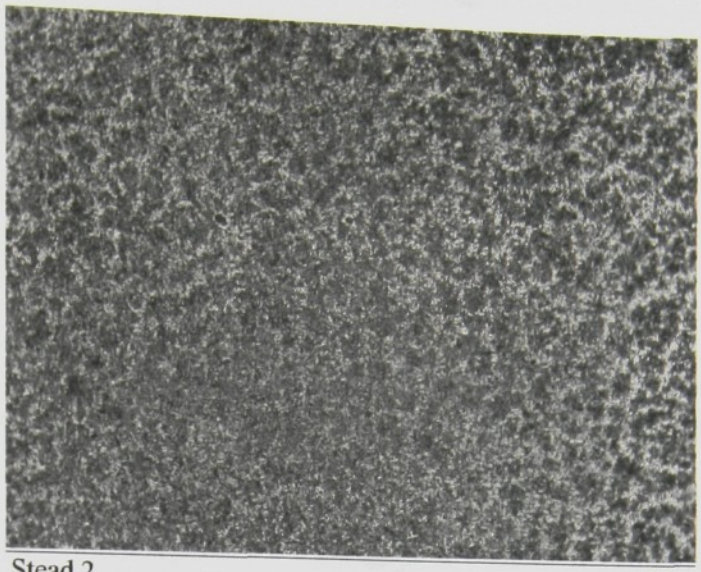


STEAD 2 20x

Obr.č.168 eutektické buňky na řezu válcového špalku, vzestupně: kraj, stěna, osa

Neleptáno 100x

Obr.č.169 grafit na metalografickém výbrusu válcového špalku vzestupně: kraj, stěna, osa

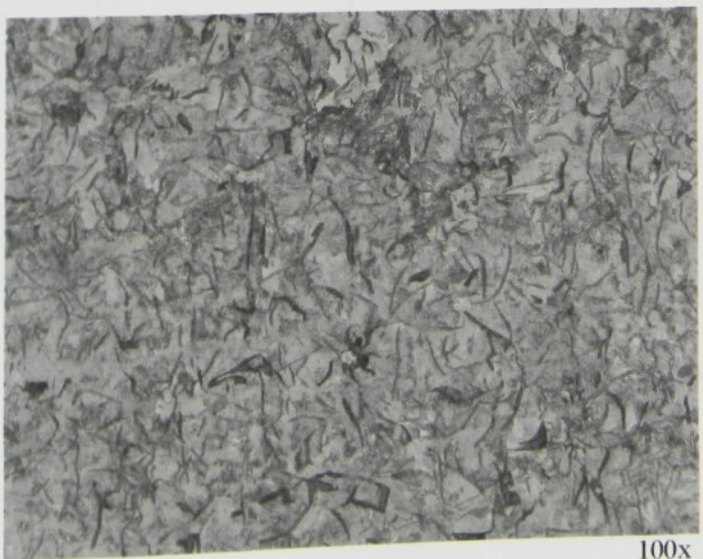


Stead 2 20x

Obr. č.170 eutektické buňky

neleptáno 100x

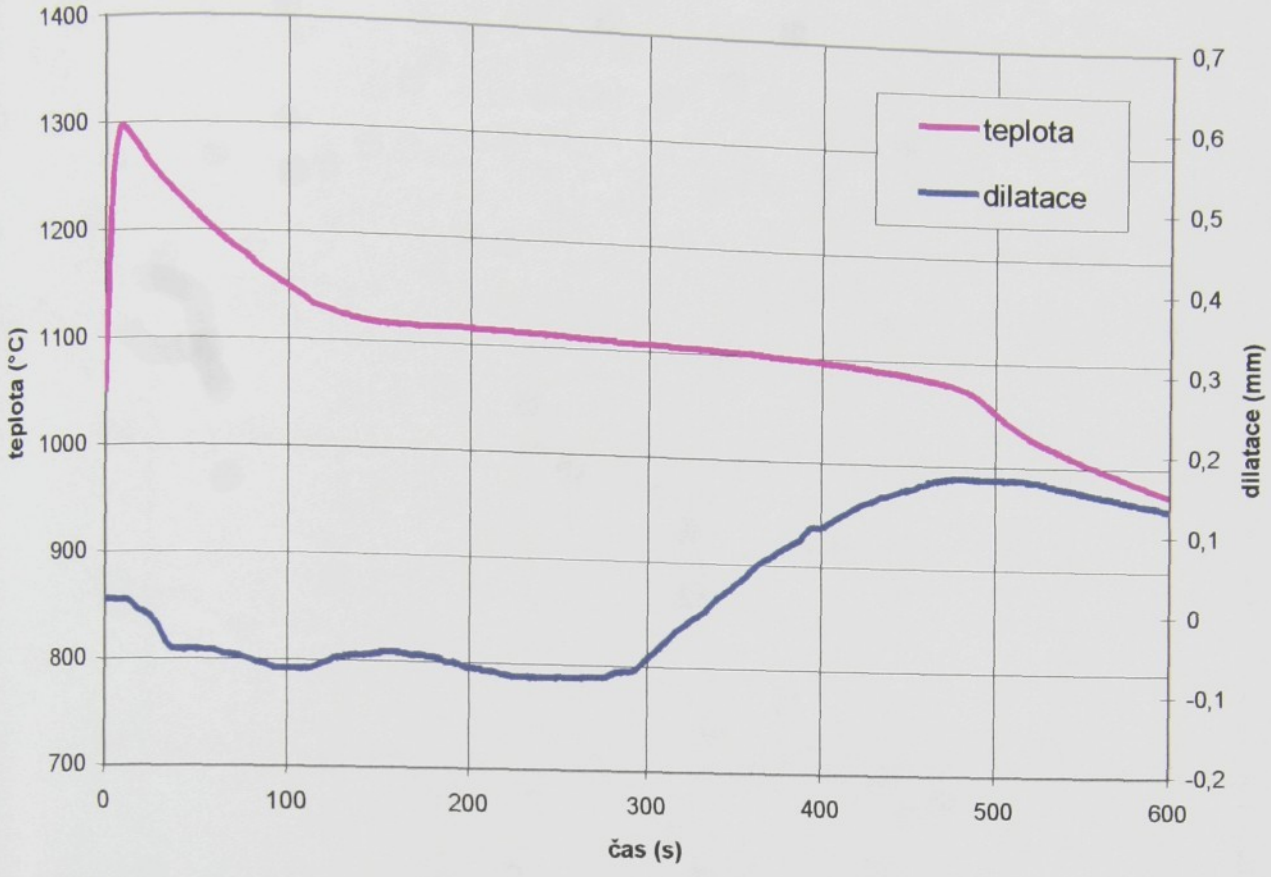
Obr. č.171 grafit



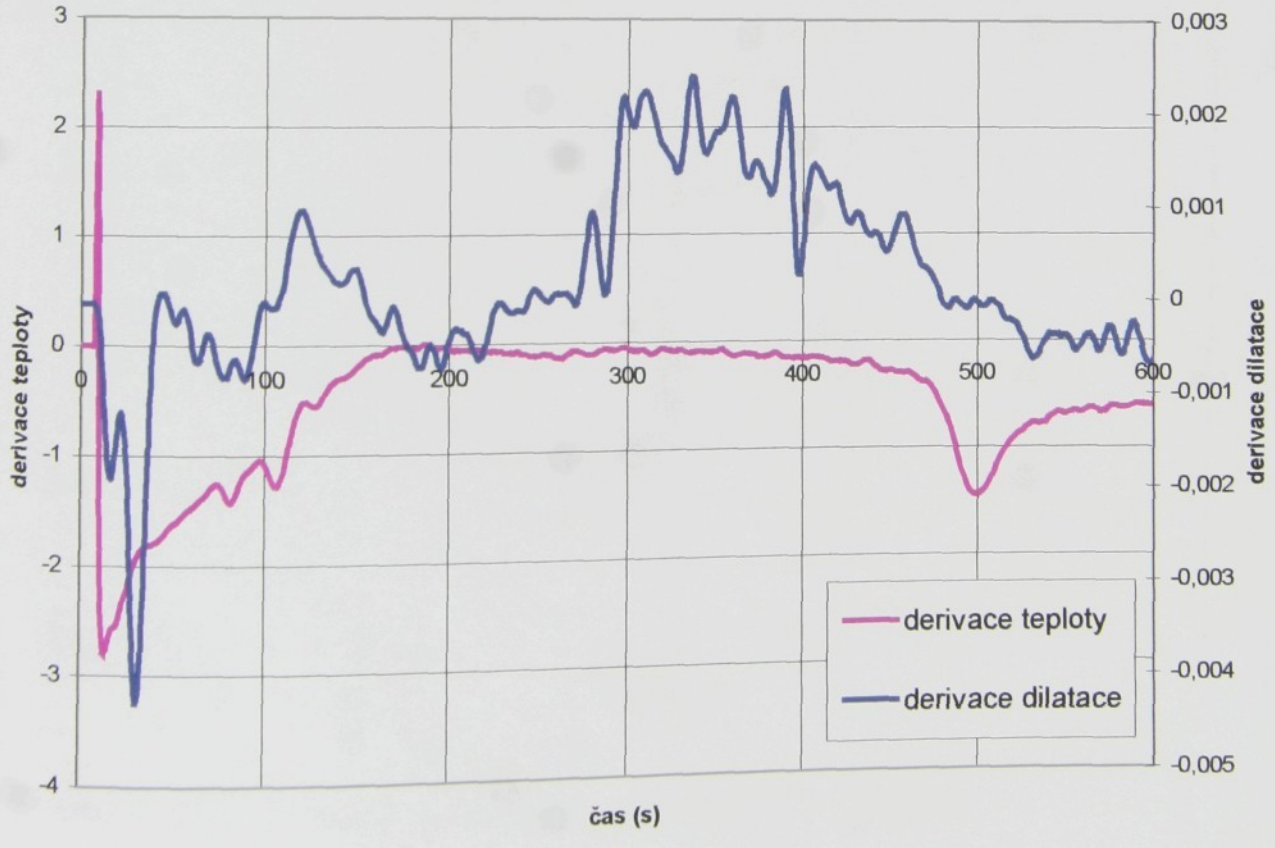
100x

Nital 2%

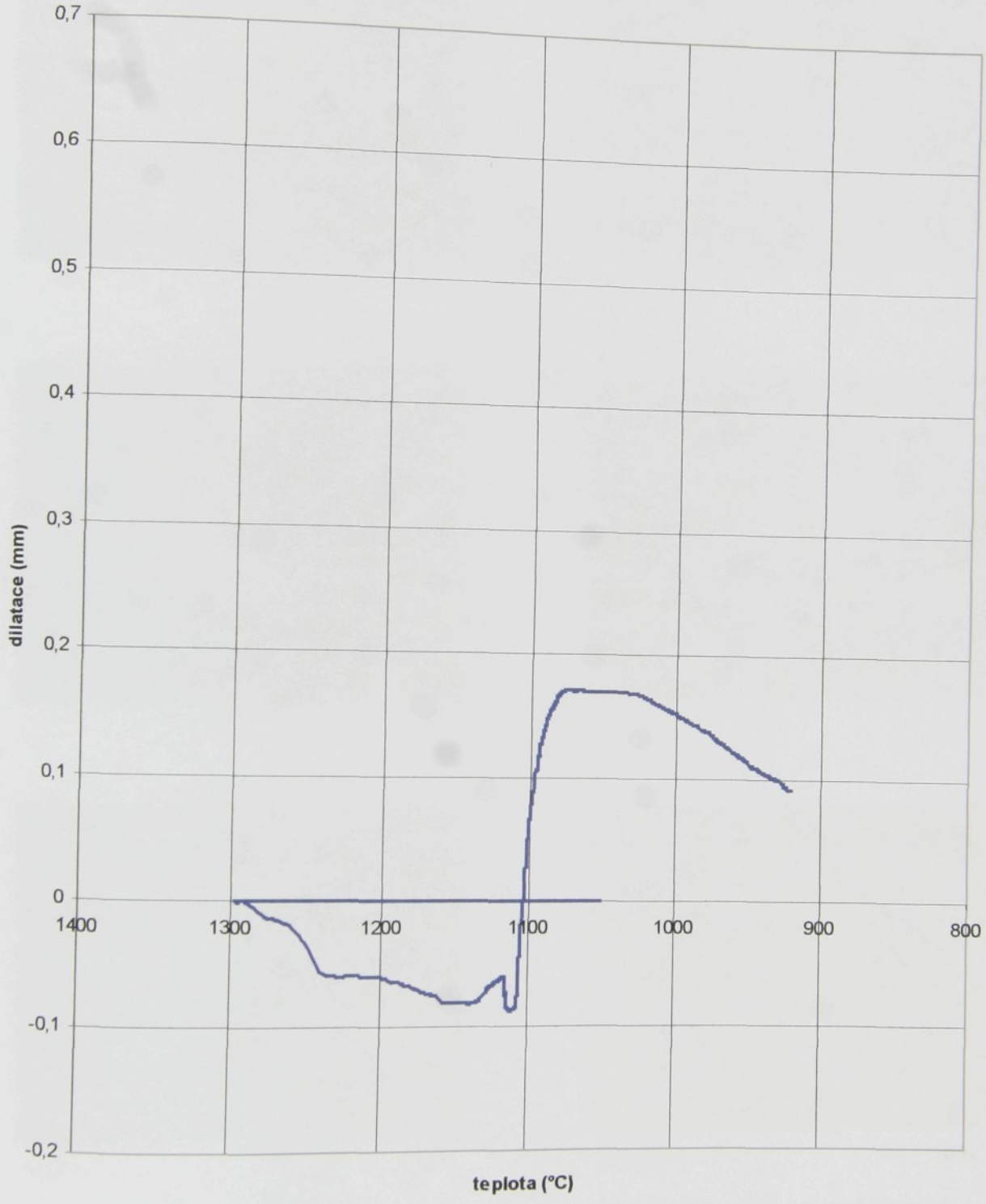
Obr. č.172 kovová matrice



Obr. č. 173 Časový průběh teploty a dilatace, zkouška č. Š 77 (LČG)

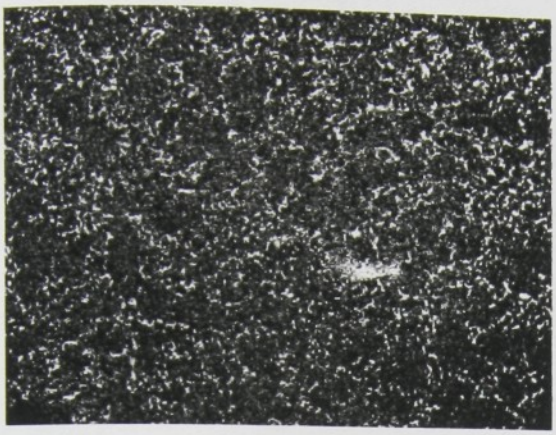


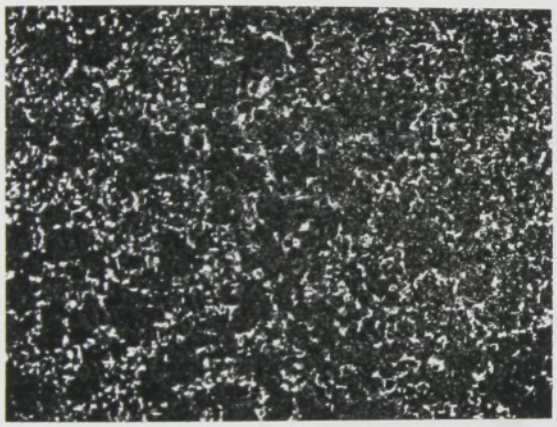
Obr. č. 174 Derivace průběhu teploty a dilatace, zkouška č. Š 77 (LČG)

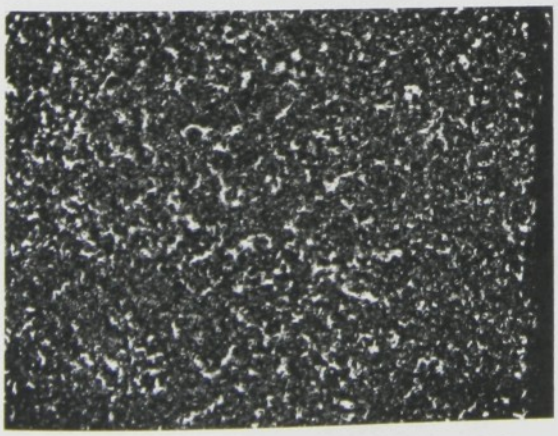


Obr. č. 175 Dilatace = f(teplota), zkouška č. Š 77 (LČG)

Válcový špalek – zkouška č.Š 77, metalografický rozbor: eutektické buňky a grafit

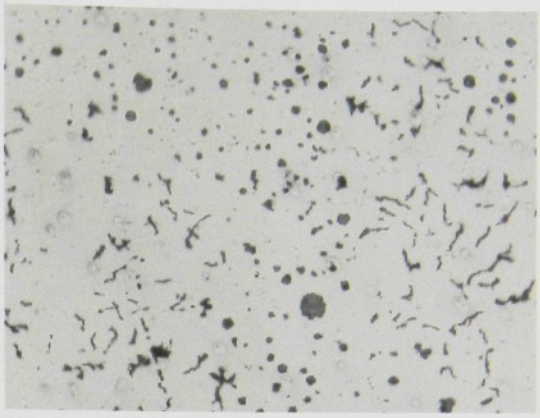


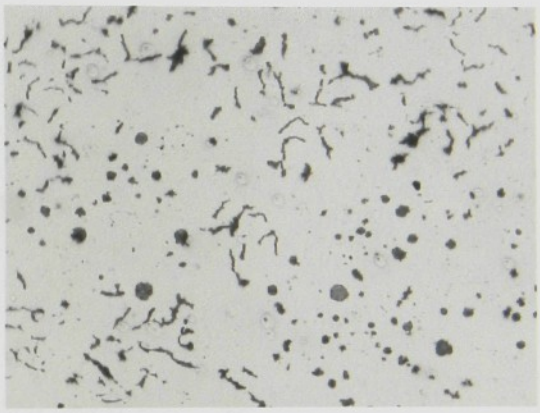


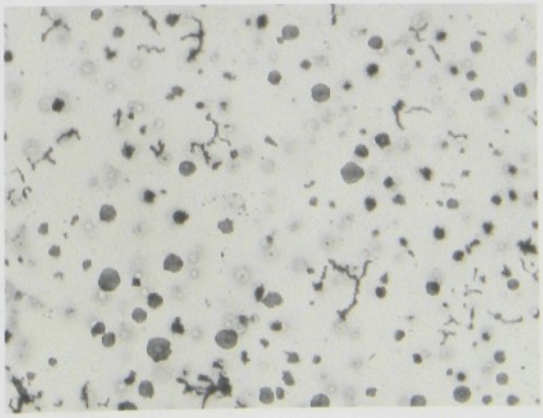


STEAD 2 20x

Obr.č.176 eutektické buňky na řezu válcového špalku, vzestupně: kraj, stěna, osa



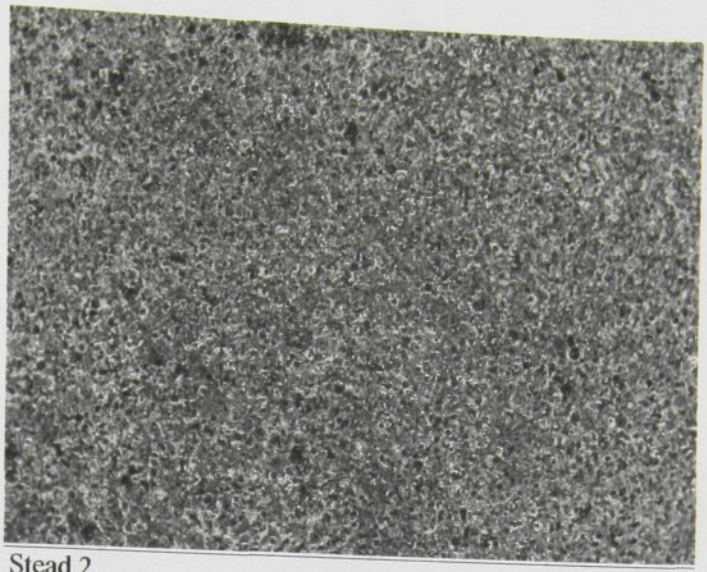




Neleptáno 100x

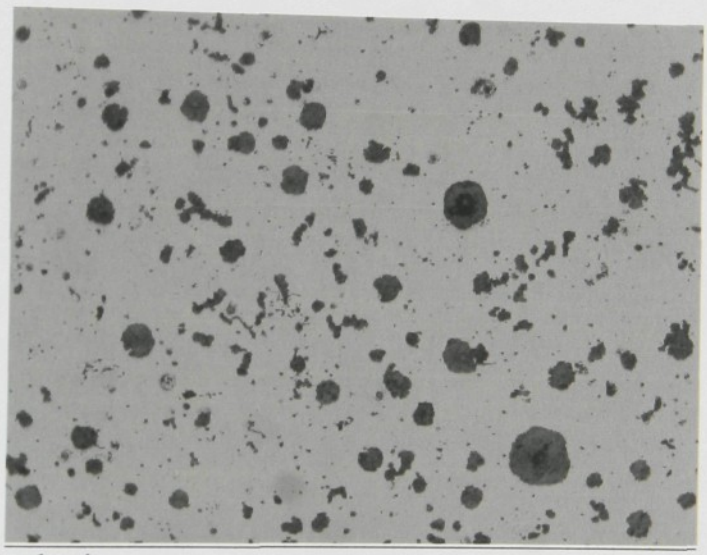
Obr.č.177 grafit na metalografickém výbrusu válcového špalku vzestupně: kraj, stěna, osa

Metalografický rozbor odlitku *víka ložisek bloku válců* ŠKODA v místě vnitřních vad zkouška č. Š 77



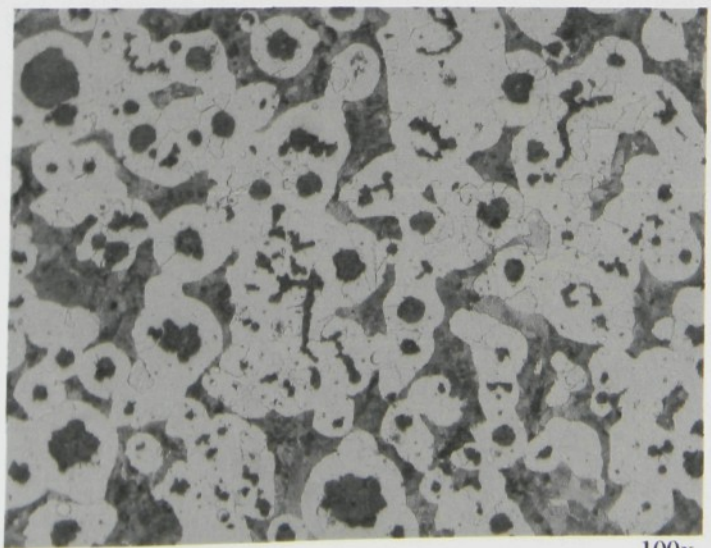
Stead 2 20x

Obr. č.178 eutektické buňky



neleptáno 100x

Obr. č.179 grafit



Nital 2% 100x

Obr. č.180 kovová matrice

D 384 S

Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra strojírenské technologie

VLIV PODMÍNEK GRAFITIZACE LITIN NA VZNIK ŘEDIN A STAŽENIN V ODLITCÍCH

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Autor : Ing. Petr VODIČKA
(ŠKODA AUTO a.s.)

Školitel : Prof. Ing. Jaroslav EXNER, CSc.
(TU Liberec)

2003

Obsah

Úvod 4
Metodika experimentální práce 5
Zkušební odlitek - *válcová tyč* 5
Zkušební odlitek - *válcový špalek* 6
Popis sériových odlitků 7
Použité formovací materiály 8
Použité tavící agregáty, použitá kvalita litiny a její sekundární zpracování 9
Popis provedených měření 9
Vyhodnocení naměřených teplotních a dilatačních charakteristik 10
Charakter a průběh dilatačních dějů během tuhnutí litin 12
Zkoušky s *válcovou tyčí* 12
Zkoušky s *válcovým špalkem* 13
Zkoušky se sériovými odlitky 14
Vliv konstrukce zkušebního odlitku na dilatační křivky 14
Vliv grafitické expanze (L2max-L1min) na maximální expanzi (L2max) 15
Vliv vsázky a tavícího agregátu 17
Vliv chemického složení 17
Vliv licí teploty 17
Vliv sekundárního (mimopecního) zpracování taveniny 17
Závěr 20
Literatura 21
Resumé 24
Résumé 25

Úvod

Na základě zvyšujících se požadavků na hodnoty užitných mechanických vlastností u litinových dílů, při zachování stávající či nižší úrovně nákladů na jejich výrobu a zpracování, přetrvává potřeba zabývat se i nadále řešením problematiky předcházení vzniku skrytých slévárenských vad - vnitřní homogenity odlitků z litin s lamelárním, červíkovitým a kuličkovým grafitem.
Vedle oceláren a sléváren odlitků z litiny s kuličkovým grafitem , které mají s touto problematikou bohaté zkušenosti , je třeba věnovat stejnou pozornost těmto vadám u odlitků ze šedé litiny a při jejich zkoumání využít nejmodernějších dostupných metod. S těmito vadami se setkáváme nejen tam , kde sama konstrukce předurčila vznik tepelného uzlu (např. křížením stěn či vlivem technologických nálitků), ale i u sortimentů konstrukčně jednoduchých rotačních o hmotnosti již od 10kg s tloušťkou stěny cca 15 mm , jako například u brzdových kotoučů či brzdových bubnů (při hmotnosti cca 70kg a tloušťce stěn cca 20 mm).
Teorií vzniku ředin a staženin se již téměř půl století systematicky zabývá řada našich i zahraničních slévárenských odborníků. Můžeme tedy konstatovat, že základní principy odstranění negativních vlivů vzniku těchto vad jsou dostatečně známy. Jeden z technologických důvodů a přetrvávajících problémů je zejména nízká univerzálnost současně používaných technologických celků : výkonných automatických formovacích linek , které jsou používány pro své nízké výrobní náklady u sériové a hromadné výroby a to i u uvedených problémových typů odlitků.

Z těchto důvodů nelze zcela úspěšně využít například kovových chladítek či operativní změny formovacích materiálů k ovlivnění posunutí tepelné osy při tuhnutí taveniny ve stěně odlitku do míst, kde nebude mít ředina či staženina významný vliv na funkčnost odlitku. Nelze také zásadně měnit chemické složení šedé litiny z důvodů předepsaných mechanických vlastností požadovaných odběratelem. Ani nálitkování nemusí být vždy jednoznačným úspěšným řešením daného problému, ať technicky či ekonomicky , a to z mnoha důvodů . Například : vzhledem ke konstrukci odlitku velikosti tepelného uzlu a jemu odpovídající velikosti nálitku , možností výroby formy s nálitkem , zvýšení přímých nákladů na nákup podnálitkových vložek a v neposlední řadě i nižším využitím kovu ve formě spolu se zvýšenou pracností v provozu cídírny.
Z uvedeného vyplývá nutnost věnovat se hlubšímu studiu metalurgických faktorů ovlivňujících vnitřní vady homogenity při relativně konstantní kvalitě pískové formy. Vzhledem k tomu , že krystalizace grafitu je doprovázena objemovými změnami, především v oblasti tuhnutí eutektika , kdy dochází ke grafitické expanzi , si práce klade za cíl vyhodnotit vlivy sekundární (mimopecní) úpravy taveniny na průběh uvedených dilatačních dějů.

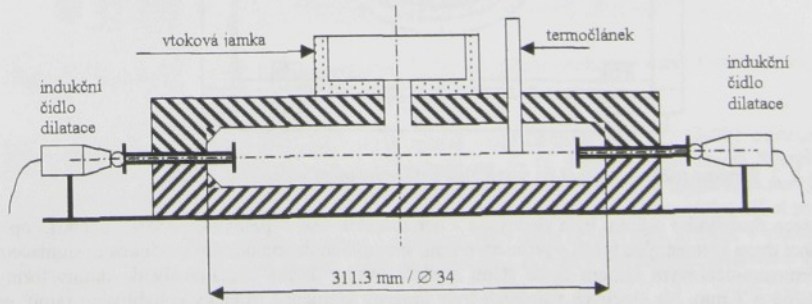
Celý výzkum by měl ukázat možnosti ovládnutí průběhu krystalizace grafitu a zejména oblast průběhu grafitické expanze v intervalu tuhnutí metalurgicky správně ošetřené tekuté litiny.

Metodika experimentální práce

Pro vyhodnocení vlivu podmínek grafitizace litin na homogenitu odlitků byla jako základní zvolena metoda měření průběhu dilatací a teploty při procesu tuhnutí definovaně metalurgicky upravené tekuté litiny ve zkušební formě. V některých případech byly tyto zjištěné výsledky porovnány s kvalitou souběžně odlévaných sériových odlitků. Z důvodů co neobjektivnějších podkladů pro hodnocení sledovaného děje byla provedena doprovodná měření a vyhodnocení : kontrola kvality taveniny po naočkování, metalografický rozbor vzorků, hodnocení homogenity zkušebních i sériových odlitků a další. Pro laboratorní zkoušky byly použity dva typy konstrukčně odlišných zkušebních odlitků. Měření se vzhledem k různým typům tavících agregátů a sekundární metalurgie prováděla ve více slévárnách: TU Liberec, Slévárna Liberec, H.Kyncl Turnov, ČKD Hradec Králové, Metalurgie Rumburk a Slévárna litin ve ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi. Při provozních zkouškách byly použity dva typy odlitků ze sériové výroby ve Slévárně litin ŠKODA AUTO a.s. Jednalo se o odlitky: *brzdový buben* z LLG a *rošt* z LČG, ve kvalitě blízké LKG.

Zkušební odlitek - *válcová tyč* (VT, zkoušky označené indexem T)

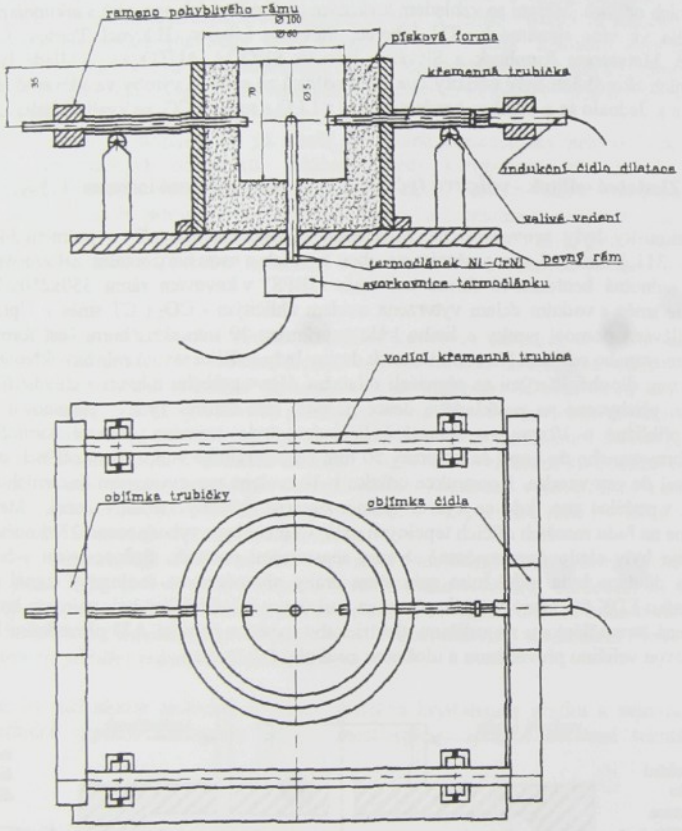
První zkoušky byly provedeny na zkušebním odlitku ***válcové tyči*** o průměru 34 mm a délce modelu 311,3 mm s 5 mm sražením na obou koncích s osou horizontálně zaformovanou. Formu tvořila jednotná bentonitová formovací směs (JBFS) v kovovém rámu 350x250x(2x150) mm, ojediněle směs s vodním sklem vytvrzená oxidem uhličitým - CO_2 (CT směs). Upravená slitina byla odlévána pomocí jamky a licího kůlu o průměru 10 mm skrze horní část formy do středu předformovaného odlitku. Na obou koncích dutiny byly v dělící rovině založeny křemenné trubičky cca 80 mm dlouhé, kterými se přenášeli dilatační děje v průběhu tuhnutí a chladnutí na indukční snímače, přichycené na podkladové desce nesoucí rám formy. Tyčky přesahovaly do dutiny formy přibližně o 10 mm, viz obrázek č. 1. Teplota byla snímána pomocí termočlánku NiCr-Ni zaformovaného do horní části formy 50 mm od centrálního vtoku. Termočlánek svým koncem zasahoval do osy vzorku. Konstrukce odlitku byla zvolena pro zvýraznění lineárních změn během tuhnutí v podélné ose, kde se vytvoří jednorozměrně výrazný tepelný uzel, který se časem rozpadne na řadu menších dílčích tepelných uzlů. Celkem bylo vyhodnoceno 23 zkoušky.
Oba děje byly sledovány současně dvěma separátními počítači, sjednocenými v čase. Snímaná hodnota dilatace byla indukčním snímačem dráhy převedena na analogový signál pomocí A/D převodníku EDK 87, který byl dále přenesen a uložen v PC. Obdobně byla snímána hodnota teploty převedená termočlánkem na veličinu elektrického napětí a pomocí A/D převodníku DMP 506 na analogovou veličinu převedenou a uloženou na druhý PC.



Obr. č. 1 Schéma měření dilatací na horizontálně zaformované *válcové tyči*.

Zkušební odlitek - *válcový špalek* (VŠ, zkoušky označené indexem Š)

Válcový špalek je zkušební odlitek tvaru válce s vertikální osou o průměru 60 mm, vysoký 70 mm, odlévaný gravitačně shora přímo do dutiny formy. Ta byla vyrobena z formovací směsi s vodním sklem (výjimečně z JBFS, nebo byla použita kokila stejných rozměrů k porovnávacím měřením) a založena do 5 mm silného hliníkového rámu, viz obrázek č. 2.



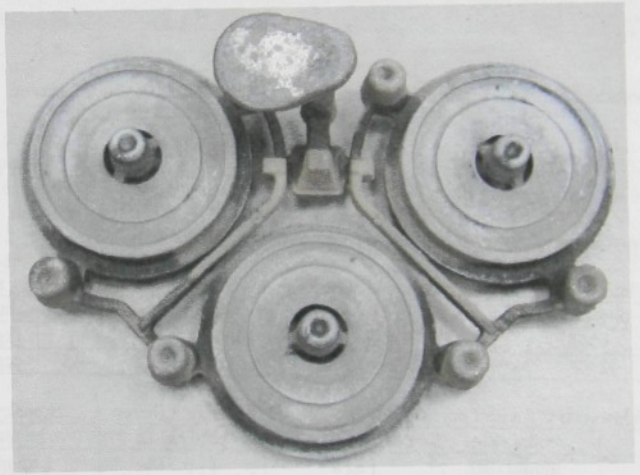
Obr. č. 2 Schéma měření dilatací na vertikálně zaformovaném *válcovém špalku.*

Dilatace zkušebního odlitku byla sledována v horizontální ose v polovině výšky odlitku, opět pomocí dvou křemenných tyček o průměru 6 mm, spojujících dutinu odlitku s indukčním snímačem a křemenno-ocelovým rámem skrze stěnu a plášť formy. Tyčky přesahovaly do dutiny formy přibližně o 7 mm. Na otočných válečcích byly usazeny křemenné trubičky pohyblivého rámu, na který je fixována jedna ze dvou tyček přenášející tento dilatační pohyb na jediný snímač upevněný na opačné straně rámu, který tak vyhodnocuje celkové délkové změny v měřené ose. Teplota byla

měřena pomocí termočlánku NiCr-Ni zaformovaného zespodu v ose odlitku do výšky shodné s osou křemenných tyček. Zkušební a měřící zařízení bylo sestaveno podle NÁNDORIHO viz [9]. Celkem byly odlity 84 vyhodnocené zkoušky.
Uvedená konstrukce zkušebního tělesa se hodí pro záznam lineárních změn probíhajících v ose jediného definovaného tepelného uzlu. Naměřené hodnoty obou veličin (dilatace - D, teplota - T) byly snímány jediným A/D převodníkem PC-2T [66], který předával oba signály najednou jedinému PC, kde se data ukládala a pomocí převodníku dále zpracovávala (1. derivace).

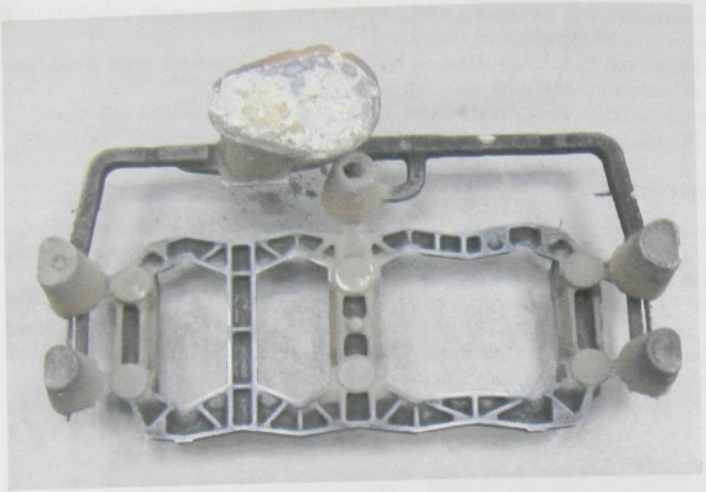
Popis sériových odlitků

Ke zhodnocení vlivu průběhu dilatace na vznik staženin u sériových odlitků při tuhnutí upravené taveniny ve formě pro zkušební odlitek, byly ve slévárně litin ŠKODA AUTO a.s. pro tyto účely vybrány dva reprezentativní odlitky.
Pro oblast LLG byl vybrán odlitek ***brzdový buben ŠKODA*** ČSN 42 2425, viz obrázek č.2. Rozměry cca ∅ 246 x 12/20 mm, hrubá hmotnost odlitku cca 6 kg. Výroba na plnoautomatické lince STONE WALWORK I. s horizontální dělící rovinou a velikosti rámu 700x500x(2x200) mm. Jedná se o společné zkoušky s válcovým špalkem č. Š 63 – 71.



Obr.č. 3 Uspořádání odlitků *brzdových bubnů ŠKODA* spolu se vtokovou a nálitkovou soustavou.

Pro oblast LČG (blížící se LKG) byl vybrán odlitek ***rošt ŠKODA*** AŠN 42 24-001 o rozměrech 370 x 160 x 70 mm. Odlitek je konstrukčně sestaven ze tří půlložisek spojených žebrovanou přírubou, ve formě jsou dvě nepravá HB jadra na obou koncích odlitku, jeho hrubá hmotnost je cca 6 kg. Díl se vyrábí na poloautomatické lince STONE WALWORK II. s horizontální dělící rovinou a jediným nálitkovaným odlitkem v rámu o velikosti 500x400x(2x160) mm. Odlitek s vtokovou a nálitkovou soustavou viz obrázek č.4. Jedná se o společné zkoušky s válcovým špalkem č. Š 74 – 78.



Obr. č. 4 Uspořádání odlitku *rošt ŠKODA* spolu se vtokovou a nálitkovou soustavou.

Použité formovací materiály

Použité formovací materiály u jednotlivých typů zkoušek viz tabulky č. 1, 2, 3.

Tabulka č.1 Vlastnosti JBFS použitých ve Slévárně Liberec a.s. a TU Liberec, zkoušky s VT.

Vlastnost	obs. Bent	vlhkost	prodyšnost	pevnost v tl.	spěchov.	hustota
Jednotka	[%]	[%]	[j.p.SI]	[kPa]	[%]	[kg.m^{-3}]
Hodnoty	2 - 3	3 – 4	min. 200	min. 250	35 – 45	cca 1600

Tabulka č.2 Vlastnosti CT směsi pojené CO_2, předpis dle Slévárny Liberec a.s., zkoušky s VŠ.

Vlastnost	vodní sklo	pevnost v tlaku	prodyšnost	hustota
Jednotka	modul (m)	[kPa]	[j.p.SI]	[kg.m^{-3}]
Hodnoty	2,4	min. 700	min.400	cca 1500

Tabulka č.3 Vlastnosti JBFS používané ve Slévárně ŠKODA AUTO a.s., sériové odlitky.

Vlastnost	obs. Bent	vlhkost	prodyšnost	pevnost v tl.	spěchov.	hustota
Jednotka	[%]	[%]	[j.p.SI]	[kPa]	[%]	[kg.m^{-3}]
Hodnoty	5,6 – 6,2	3 – 3,7	min 100	115 – 160	45 – 62	cca 1600

Pro doplnění měření byla vyrobena i ocelová forma – kokila, na které se sledoval dilatační proces tuhnoucí taveniny (při různé rychlosti odvodu tepla formou) ovlivněný stupněm předehřátí kokily: 20°C, 200 °C a 400 °C (zkoušky č. Š39 - Š48).

Použité tavící agregáty, použitá kvalita litiny a její sekundární zpracování

Pro porovnání provozních a laboratorních podmínek uvedené dilatační zkoušky byla použita tavenina vyrobená v různých pecích (indukčních, kupolních i plynových pecích). Jednotlivé tavící agregáty, použitá kvalita litiny a jejího sekundárního zpracování jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tabulka č. 4 Použité tavící agregáty, použitá kvalita litiny a její sekundární zpracování, (VT, VŠ).

Slévárna, tavící agreg	Použitá kvalita litiny	sekundární zpracování	druh modif.,očkovadla
TU Liberec indukční pec 20 kg	LLG ČSN 42 2420 ČSN 42 2425 LKG ČSN 42 2340	očkování do proudu taveniny při přelévání modif.polévací metoda	FeSi 75 Zircinoc, Superseed FeSiMg **zkoušky VT + VŠ**
Slévárna Liberec a.s. kuplovny 1000 mm	LLG ČSN 42 2420 ČSN 42 2425	očkování do proudu taveniny při přelévání	FeSi 75 Zircinoc, Superssed **zkoušky VT**
ŠKODA AUTO a.s. MB, indukční pece 4t	LLG ČSN 42 2425,P VW TL 011 LČG AŠN 42 24-001	očkování do proudu taveniny při přelévání modif.polévací metoda	FeSi 75 Zircinoc, Superssed FeSiMg , CuSb RANCO-Impfkohle **zkoušky VŠ+ sér. odlitky**
Henry Kyncl Turnov kuplovny 7000 mm,0,5t indukční pec	LLG ČSN 42 2420 ČSN 42 2430 LKG ČSN 42 2340, 60	očkování do proudu taveniny na žlábku modif.skrz komoru	FeSi 75 Zircinoc, Superssed FeSiMg **zkoušky VŠ**
Metalurgie Rumburk a.s. rotační 12 t plynová pec	LLG ČSN 42 2420	očkování do proudu taveniny na žlábku (prodleva 15 min)	FeSi 75 0,3% Sb 0,03% **Zkoušky VŠ**
ČKD a.s. HK, kuplovny 1500 mm	LLG ČSN 42 2425	očkování do proudu taveniny při přelévání (prodleva 15 min)	FeSi 75 **Zkoušky VŠ**

Popis provedených měření

V rámci každého jednotlivého měření byly provedeny následující činnosti :

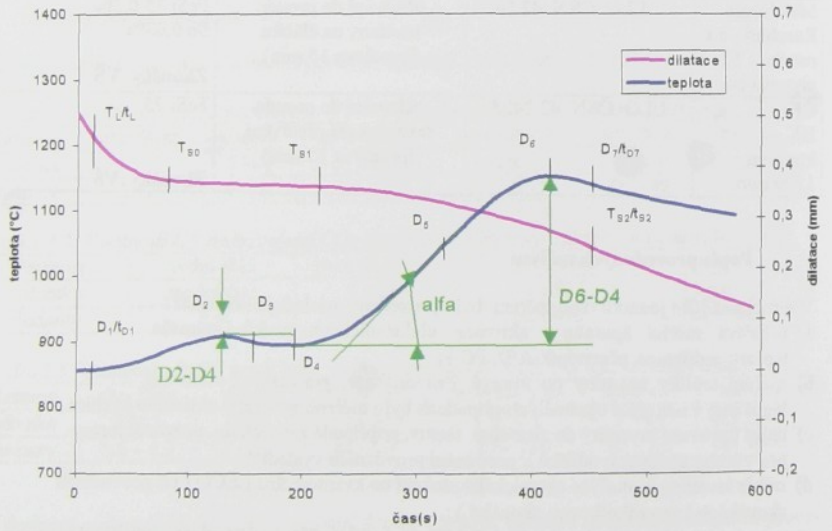
a) příprava měřící aparatury, aktivace elektronických prvků (snímače teploty a dilatace, převodník A/D, PC) ;
b) měření teploty taveniny po úpravě (modifikace, grafitizační očkování, legování) v několika ojedinělých případech bylo měřeno množství aktivního kyslíku ;
c) nalití upravené taveniny do zkušební formy, popřípadě zároveň do provozní formy pro výrobu sériových odlitků k porovnání provozních výsledků ;
d) odběr taveniny k analýze chemického složení na kvantometru LECO (při provozních zkouškách i pro zákalkovou zkoušku) ;
e) snímání a evidence teplotní a dilatační křivky,konec měření pod teplotou 900°C ;
f) po vychladnutí byly zkušební odlitky (v případě provozních zkoušek i sériové odlitky) otryskány a podrobeny dalším destruktivním (metalografické hodnocení) i nedestruktivním zkouškám (zkoušky prozařovací, měření ultrazvukovým tlouškoměrem).

Vyhodnocení naměřených teplotních (T) a dilatačních (D) charakteristik

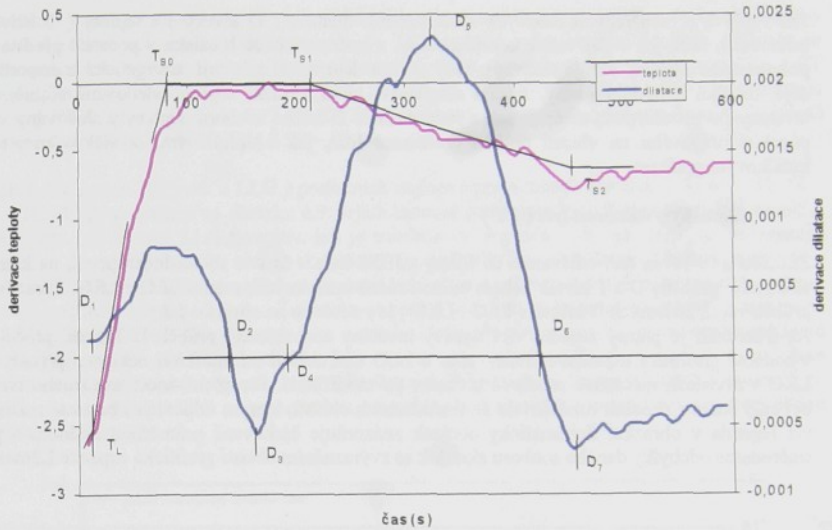
Z průběhů T a D křivek byly odečteny hodnoty velikosti a časového umístění charakteristických bodů odpovídajících krystalizačním stádiím litiny, viz obrázek č. 5. a byly dále zpracovávány viz obrázky č. 6 a 7.

Na teplotní křivce a především po její derivaci, bylo možné popsat : maximální naměřenou teplotu odlévané taveniny T max, teplotu likvidu T_L(v čase t_L), eutektickou reakci vlivem chemického složení (Si, P ...) charakterizovanou intervalem teplot - počáteční teplotu eutektické reakce T_{S0}, derivací křivky zvýrazněnou změnu charakteru poklesu teploty T_{S1}, pravděpodobné ukončení tuhnutí při teplotě T_{S2} (v čase t_{S2}) a hodnotu případného podchlazení Δ TE .

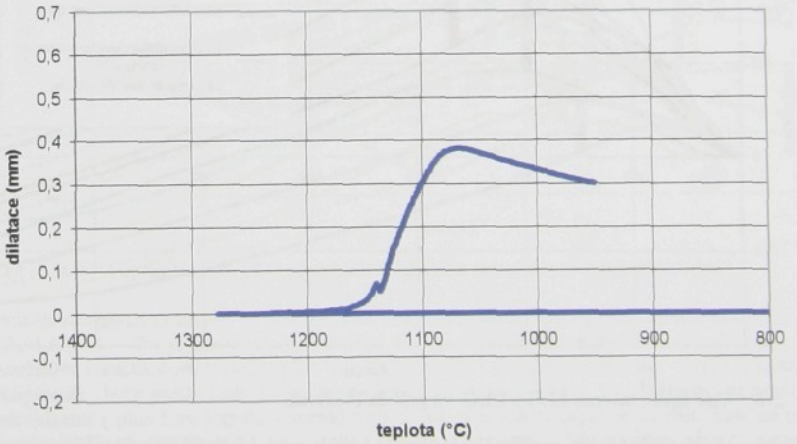
Jako charakteristické dilatační body na získaných křivkách byly evidovány : hodnota D_1 odečtená při dosažení teploty likvidu T_L, první maximum D_2 (v tabulkách jako L_{1max}, v čase t_{1max}), inflexní bod klesající křivky z prvního maxima D_3 , první minimum D_4 (v tabulkách jako L_{1min}, v čase t_{1min}), absolutní hodnota poklesu z prvního maxima $D_2 - D_4$ (v tabulkách jako $L_{1max} - L_{1min}$), úhel stoupání při dosažení druhého maxima α, inflexní bod stoupající křivky před druhým maximem D_5, druhé maximum D_6 (v tabulkách a grafech jako L_{2max}, v čase t_{2max}, při teplotě T_{2max}), absolutní hodnota druhého maxima $D_6 - D_4$ (v tabulkách a grafech jako hodnota $L_{2max} - L_{1min}$) , inflexní bod na poklesu křivky z druhého maxima D_7 odpovídající přibližně teplotě T_{S2} .



Obr. č. 5 Průběh teploty a dilatace s charakteristickými body, zkouška č.Š32.



Obr. č. 6 Průběh derivací s charakteristickými body, zkouška č. Š32.



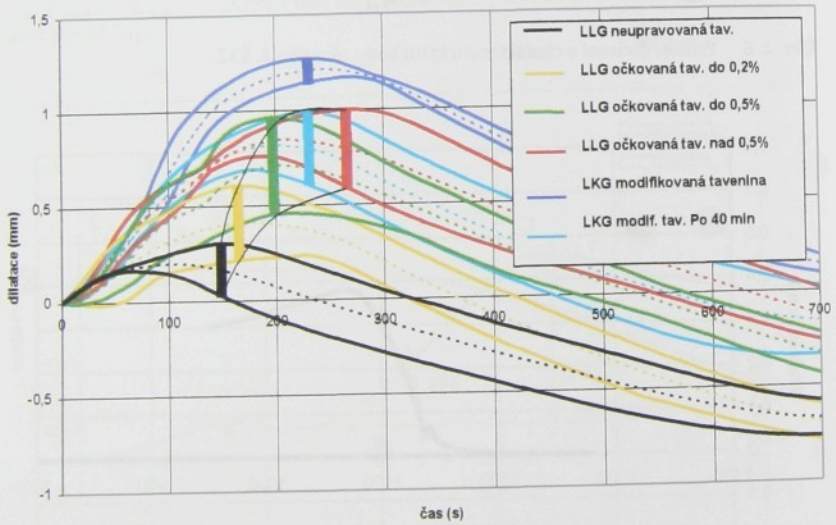
Obr. č. 7 Průběh křivky dilatace – teplota zkoušky č. Š32.

Charakter a průběh dilatačních dějů během tuhnutí litin

Jak vyplývá z naměřených časových charakteristik dilatace (D křivky) a teploty (T křivky) tuhnoucích litin, jde o děj velice komplikovaný, z matematického hlediska v podstatě představuje polyvariantní systém. Ten je složený z řady dílčích dějů, které zahrnují energetické transportními děje, dilataci materiálu formy, změnu skupenství kovu, difuzní děje ve sledované slitině, stav taveniny po metalurgických úpravách a řadu dalších. Z celého souboru dějů byly sledovány vlivy působící především na vlastní průběh grafitizace litin, jak s lupínkovým, červíčkovým , tak i kuličkovým grafitem.

Zkoušky s *válcovou tyčí* (*VT*)

Zkouška s *válcovou tyčí* odlévanou do formy s JBFS byla v časové souslednosti první, na které se sledovaly průběhy D a T křivek během tuhnutí různě upravených tavenin LLG a LKG. Zpracovaný průběh všech získaných D křivek (LLG i LKG) je v souhrnu na obrázku č.8.
Již z obrázku je patrný zásadní vliv úpravy taveniny na výsledný průběh D křivek, především v hodnotě grafitické expanze L2max, a to u LLG v závislosti na množství očkovací přísady a u LKG v závislosti na časové prodlevě taveniny po modifikaci. Pro přehlednost uvedeného tvrzení byl celý soubor zkoušek rozdělen do šesti základních oblastí, kterým odpovídá i barevné rozlišení, viz legenda v obrázku. Schématický obrázek znázorňuje čárkovaně průměrnou hodnotu a plně směrodatné odchylky daného souboru zkoušek se zvýrazněním oblasti grafitické expanze L2max.



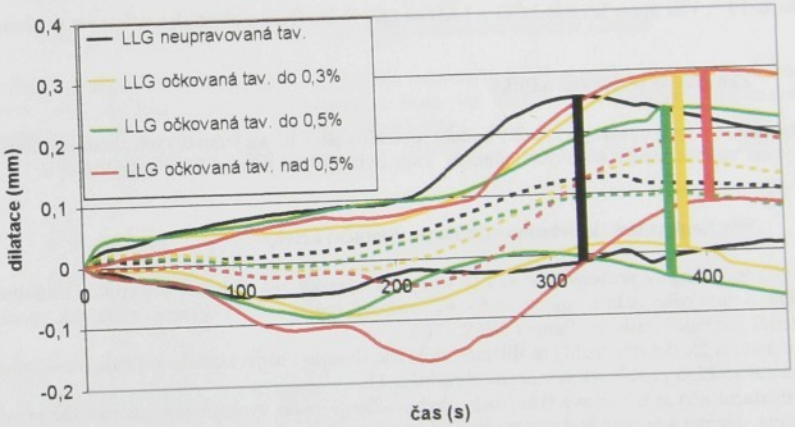
Obr. č. 8 Vliv úprav tavenin LLG a LKG na průběh D křivek.

Z obrázku vyplývá především rozdílný charakter D křivek mezi LLG a LKG, který je evidentní nejen dosaženou absolutní hodnotou L2max, ale i rychlostí stoupání. Vliv úpravy taveniny u LLG je proto patrný i na čase maximální grafitické expanze a souvisí s množstvím vneseného očkovadla. U LKG nebyl tento výrazný trend nalezen, pravděpodobně i z důvodu malého souboru provedených zkoušek.

Zkoušky s *válcovým špalkem* (VŠ)

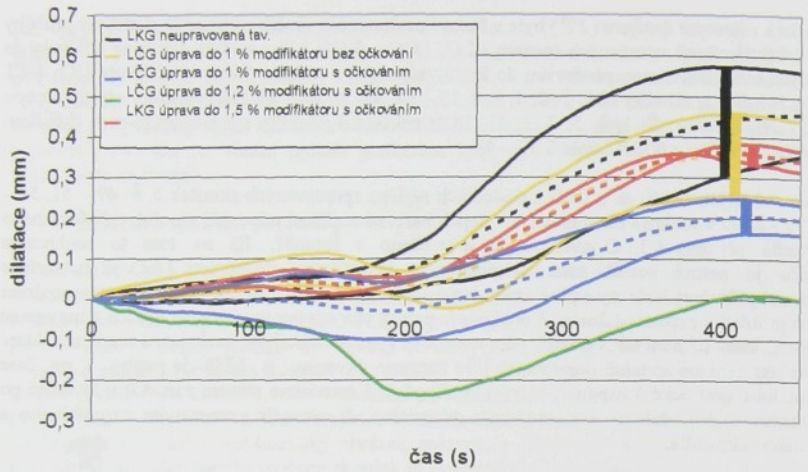
Zkouška s *válcovým špalkem* (*VŠ*) byla v časové posloupnosti druhá, na které se sledovaly průběhy D a T křivek různě upravených tavenin LLG, LČG a LKG. Pro studijní účely se odlévala do odlišných materiálů forem, především do formovací směsi s vodním sklem vytvrzované CO_2 (CT směs), jedná se o zkoušky číslo Š: 2, 4, 6, 8, 10 – 34, 36, 37, 49 – 84. Dále zkoušky s bentonitovou směsí (JBFS) číslo Š: 1, 3, 5, 7, 9, 35, 38, a nakonec i zkoušky s ocelovou formou (kokilou) předehřátou na 200 a 400 °C čísla Š:39 – 48.

Průběh získaných D křivek u LLG z posledních nejlépe zpracovaných zkoušek č. Š: 49 – 51, 54 – 72 a 79 - 84 je v souhrnu na obrázku č.9. Jejich barevné rozlišení odpovídá množství dávkovaného očkovadla při úpravě LLG taveniny, jak je uvedeno v legendě. Již na tom to souhrnném obrázku je patrný rozdíl mezi skupinami a jednotlivými zkouškami. Obrázek znázorňuje čárkovaně průměrné hodnoty a plně směrodatné odchylky daného souboru zkoušek se zvýrazněním oblasti grafitické expanze L2max. Z obrázku je patrný vliv úpravy taveniny na průběh a maximum D křivek, který již není tak výrazný, jako u válcové tyče, ale obsahuje navíc první minimum, které grafitickou expanzi zřetelně ohraničuje. Vliv úpravy taveniny u LLG je patrný i na čase maximální (grafitické) expanze, který pravděpodobně souvisí se stavem zárodků v tavenině po dosaženém stupni přehřátí a s množstvím vneseného, či přesněji s množstvím rozpuštěného a využitého očkovadla.



Obr. č. 9 Vliv úprav tavenin LLG na průběh D křivek u zkoušek s *válcovým špalkem*.

Průběh získaných D křivek ze zkoušek s LČG a LKG, odlévaných do CT forem, číslo Š10 – 23, 32,34,37, 73 – 78, je v souhrnu na obrázku č. 10. Jejich barevné rozlišení odpovídá množství použitého modifikátoru a očkovadla, viz legenda. Pro zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými skupinami byly jejich hodnoty zprůměrovány (přerušované čáry) a doplněny směrodatnými odchylkami (plné čáry) spolu s vyznačením oblasti maximální expanze L2max. Zjištěné rozdíly potvrzují vliv úpravy taveniny na průběh a dosažená maxima D křivek, která vlivem symetrické konstrukce *válcového špalku* nejsou tak výrazná jako u zkoušek s *válcovou tyčí*, ale obsahují první maximum s minimem zřetelně ohraničující začátek grafitické expanze. Tento vliv je patrný i na čase dosažení maximální expanze L2max, který pravděpodobně závisí vedle pohybu povrchové vrstvy formy především na výsledku proběhlé modifikace spolu se sekundárním očkováním.



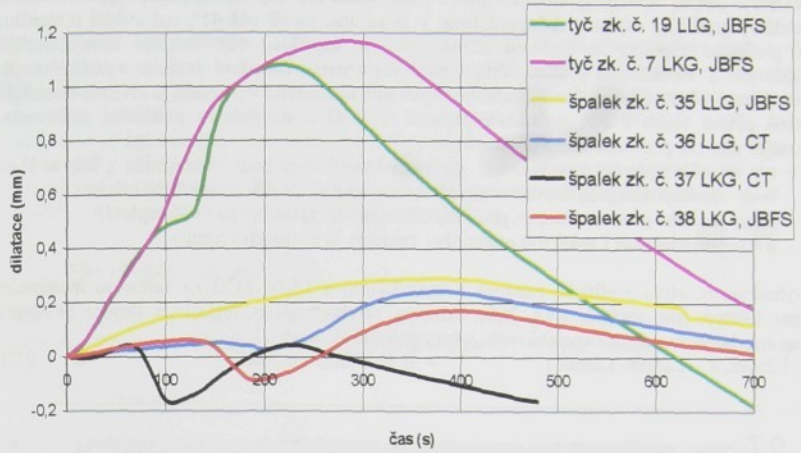
Obr. č. 10 Vliv úprav tavenin LČG a LKG na průběh D křivek u zkoušek s *válcovým špalkem* .

Zkoušky se sériovými odlitky

V tabulce č. 5 jsou uvedeny výsledky hodnot spolehlivosti (R^2) u jednotlivých zkoumaných vlivů na vznik vnitřních vad v sériových odlitcích. Vady byly zjištěné pomocí RTG defektoskopie.

Vliv konstrukce zkušebního odlitku na dilatační křivky

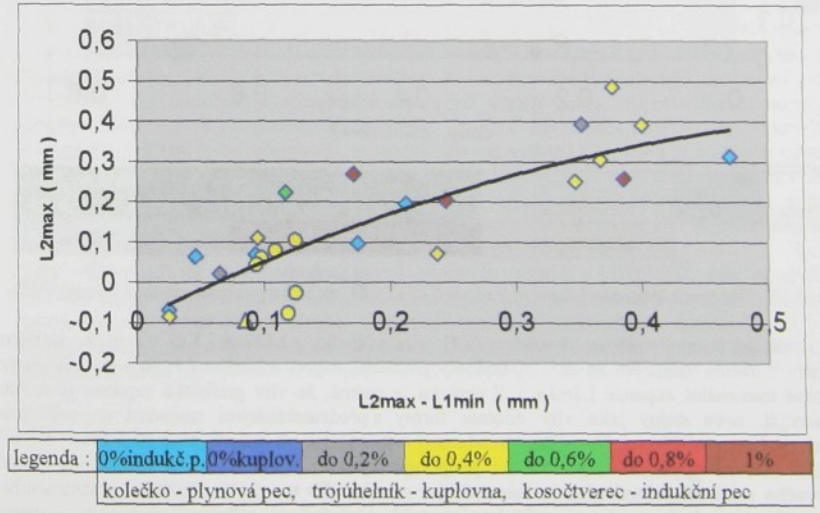
Na zjištěné dilatační průběhy tuhnoucí taveniny má výrazný vliv již sama konstrukce zkušebního odlitku – tepelného uzlu (*válcová tyč - VT, válcový špalek - VŠ*), v menší míře pak použitý materiál netrvalé - pískové formy (JBFS, CT).
Toto tvrzení lze doložit rozdíly na dilatačních křivkách mezi oběma zkušebními válcovými odlitky při zkoušení LLG i LKG, jak je vidět na obrázku č. 11.
Na dilatační křivce u válcové tyče zcela chybí, nebo je málo výrazná samostatná fáze prvního maxima, minima a naopak hodnoty maximální expanze L2max jsou velmi výrazné. Dilatace během grafitické expanze se tak zvýrazňuje nadevše a překrývá děje související s dilatací formy a předeutektickou části tuhnutí taveniny, výrazněji především u LKG. Výsledný průběh dilatačních křivek získaných u měření na *válcovém špalku* je ovlivněn jedním centrálním tepelným uzlem a má tak vyšší vypovídací hodnotu, protože lépe reaguje na jednotlivé etapy sledovaného děje a ty jsou relativně dobře rozlišitelné. Pro dobrou čitelnost jednotlivých průběhů dilatačních dějů při zkouškách na *válcovém špalku* a pro jednodušší přípravu formy se následně od zkoušek na *válcové tyči* ustoupilo.
Spolu s řadou autorů (GEDEONOVÁ, DÚL, ...) se shoduji v názoru, že je pravděpodobné, že dochází ke kapilárnímu tlaku zbylé taveniny na stěny formy spolu s roztažením jejich povrchových částí (líce formy). Na dilatačních křivkách tato část pravděpodobně splynula s grafitickou expanzí a je téměř neidentifikovatelná.



Obr. č. 11 Porovnání výsledků reprezentativních dilatačních křivek *VT* a *VŠ* .

Vliv grafitické expanze L2max-L1min na maximální expanzi L2max

Z výsledků měření na *válcovém špalku* s LLG byl sestaven trend vlivu grafitické expanze L2max-L1min na celkovou maximální expanzi L2max, viz obrázek č.12. Nalezená nejvhodnější matematická funkce má výrazný stupeň spolehlivosti:
(Y - L2max, x - L2max- L1min) $Y = -1{,}1626.x^2 + 1{,}5542.x - 0{,}0939$ $R^2 = 0{,}73$



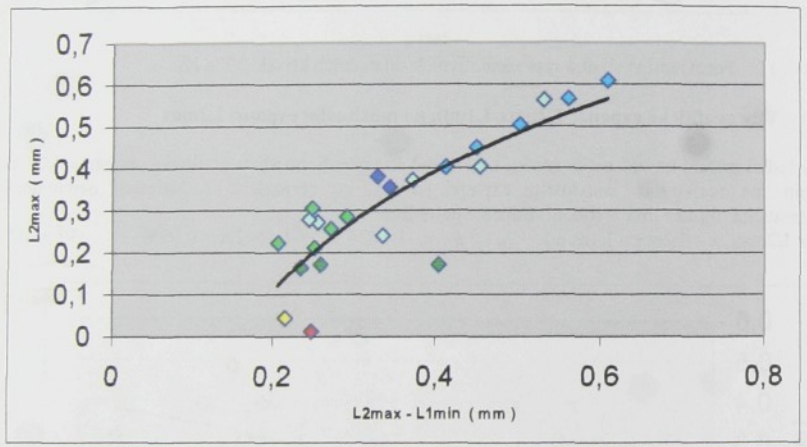
Obr. č.12 Vliv grafitické expanze L2max-L1min u LLG na celkovou max. expanzi L2max (VŠ).

Z obrázku je patrné, že trend grafitické expanze LLG začíná zápornými hodnotami L2max a s osou x (hodnoty grafitické expanze L2max-L1min) svírá úhel menší něž 45°, což svědčí o menším vlivu grafitické expanze na hodnotu L2max, než je například vliv dilatace formy a dějů předcházejících eutektickou reakci. Vzhledem k barevnému rozložení hodnot v posuzovaném souboru, které odpovídají množství použitého očkovadla uvedeného v legendě, je zřejmé, že nebyla nalezena přímá vazba mezi grafitickou expanzí u LLG a množstvím použitého očkovadla. Výraznější vliv zde pravděpodobně představuje :

- typ tavícího agregátu (zvýrazněno geometrickým tvarem bodů viz legenda), kdy se žluté body označující stejnou úroveň očkování nacházejí po celé délce proložené křivky
- režim tavícího procesu (stupeň přehřátí, doba setrvání taveniny na vyšší teplotě)
- a v neposlední řadě i vsázkové materiály (zejména % ocelového šrotu)

Při vyhodnocení vlivu grafitické expanze L2max-L1min u LKG, LČG na celkovou maximální expanzi L2max, viz obrázek č.13, byla nalezena nejvhodnější matematická funkce se stejně významnou hodnotou stupně spolehlivosti, jako v případě zkoušek s LLG :

(Y - L2max, x - L2max- L1min) $Y = 0{,}4109 \ln x + 0{,}7683$ $R^2 = 0{,}73$



legenda :	0% modif.	1%modifikátoru	1%modif.+ sek.očk.	1%mod.+ sek.očk.+CuSb
		1,2%mod.+0,4%s.očk.	1,2%mod.+0,5%s.očk.+CuSb	1,5%modif.+0,2%s.očk.

Obr. č.13 Vliv grafit. expanze L2max-L1min u LKG,LČG na celkovou max.expanzi L2max (VŠ).

Na rozdíl od hodnot souboru zkoušek s LLG jsou výsledky s LČG a LKG v téměř stejném poměru k oběma veličinám na ose x (hodnoty grafitické expanze L2max-L1min) i y (hodnoty celkové maximální expanze L2max). Z obrázku je patrné, že vliv grafitické expanze je mírně výraznější, nebo stejný jako vliv dilatace formy s předeutektickými změnami na celkovou maximální expanzi L2max. Vyznačený trend nemá svůj počátek při nulové hodnotě L2max, ale při kladné hodnotě grafitické expanze což podporuje význam jejího vlivu. Z obrázku je podle barevného rozlišení jednotlivých hodnot patrný i zásadní vliv množství použitého grafitizačního očkovadla na vyhodnocovanou grafitickou expanzi, následně na celkovou maximální expanzi L2max.

Vliv vsázky a tavícího agregátu

Jedná se o nepřehlédnutelnou počáteční podmínku ovlivňující výrazným způsobem práci s tekutým kovem až po výslednou kvalitu ztuhlého a vychladlého odlitku. Výraznější vliv tavícího agregátu se předpokládá u LLG, kde nebyl nalezen soulad mezi hodnotou grafitické expanze a množstvím použitého grafitického očkovadla. Také při vyhodnocení vlivu eutektických buněk, kde byly jednotlivé oblasti hodnot odpovídající daným tavícím agregátům neidentické.
Vliv vsázky zkoumán nebyl, ale je dostatečně znám z odborné literatury. Její význam předpokládáme především v oblasti typů zárodků, nečistot, rozpuštěných plynů atd., různě obsažených v jednotlivých komponentech kovové vsázky.

Vliv chemického složení

Zjištěné výsledky dovolují konstatovat, že jak u LLG tak u LČG,LKG nemá chemické složení významný vliv na průběh dilatačních dějů během tuhnutí upravených i neupravených tavenin

Vliv licí teploty

Velmi zajímavý je nalezený protichůdný výsledek hodnocení vlivu licí teploty mezi LLG a LČG,LKG. Jestliže u modifikovaných litin je vliv vysoké licí teploty na vznik vad a trendově i na dilatační maximum jednoznačně negativní, pak u šedých litin je tomu naopak. Nalezený rozdíl bude mít příčinu pravděpodobně v odlišném průběhu tuhnutí obou typů litin.

Vliv sekundárního (mimopecního) zpracování taveniny

Nejsledovanějším vlivem na průběh dilatačních křivek společně s výskytem vnitřních vad v odlitcích, a to jak u zkušebních, tak především u sériových odlitků, byl vliv sekundárních úprav taveniny. Celkově byly ověřovány tři typy úprav : grafitické očkování, legování a modifikace. Jestliže má modifikace nejvýraznější vliv na změnu průběhu tuhnutí litiny (nejvýraznější a nejvyšší dosažená maxima z celého souboru měření), pak grafitické očkování má zásadní vliv na změnu dilatačních dějů v souladu s výskytem uvedených vad. Rozdíly v dilatacích i ve kvalitě odlitků vlivem legování taveniny jsou zajímavé pouze při úpravě jinak neupravované taveniny, což pravděpodobně souvisí s vnášením cizích dalších zárodků. Relativním překvapením je nevýrazný vliv množství grafitického očkovadla na grafitickou expanzi u LLG, která je relativně v rozporu s hodnocením výsledků kvality sériových odlitků na vnitřní vady. Je však zcela v souladu s obecně známou představou, kdy vlivem větší grafitické expanze dojde k objemovému roztažení tuhnoucího odlitku, tím k zvětšení dutiny pískové formy a vlivem postupující krystalizační fronty odlitek sám nedokáže zásobit vlastní tepelné uzly za vzniku ředin a staženin.
Zcela odlišná situace byla vyhodnocena u sériových odlitků z LČG,LKG, kde se grafitické očkování projevilo jednoznačně kladnými výsledky a velikost eutektické dilatace byla na této úpravě taveniny téměř přímo závislá. Čím větší množství grafitizačního očkovadla při větším množství modifikátoru bylo použito, tím menší grafitickou expanzi upravená tavenina vykázala. Zjištěnou závislost lze vysvětlit pouze průběhem tuhnutí takto upravených tavenin.

Tabulka č.5 Souhrnný přehled hodnot spolehlivosti (R^2) u jednotlivých vlivů.

zkoušky	posuzovaný vliv	obr.č.	hodnota spolehlivosti R^2
VT LLG (AT)	1. Množství a druh očkovadla na L2max	69	0,31
	2. Licí teplota na L2max	70	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	3. Kvalita grafitu na L2max	71	0,44
	4. Chemické složení na L2max	72	0,19
	5. Délka eutektické reakce na L2max	73	0,47
	6. Počet eutektických buněk na L2max	74	0,36
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	75	0,52
	- počet eutektic. buněk na rychlost stoupání D křivek	76	0,49
	- množství očkovadla na počet eutektických buněk	77	0,51
	- množství očkovadla na rychlost stoupání D křivek	78	0,34
	8. Množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce	79	0,4
VT LKG (BT)	1. Množství modifikátoru na L2max	81	malé množství hodnot
	2. Licí teplota na L2max	82	malé množství hodnot
	3. Kvalita grafitu na L2max	83	malé množství hodnot
	4. Chemické složení na L2max	84	malé množství hodnot
	5. Délka eutektické reakce na L2max	85	malé množství hodnot
	6. Počet eutektických buněk na L2max	86	malé množství hodnot
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	87	malé množství hodnot
	8. Množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce	88	malé množství hodnot
VŠ LLG (AŠ)	1. Množství a druh očkovadla na L2max	91	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	množství a druh očkovadla na graf. exp. L2max-L1min	92	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	2. Licí teplota na L2max	93	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	3. Kvalita grafitu na L2max	94	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	4. Chemické složení na L2max	95	0,15
	chemického složení na grafitic. expanzi L2max-L1min	96	0,36
	5. Délka eutektické reakce na L2max	97	0,4
	délka eutekt. reakce na grafitic. expanzi L2max-L1min	98	0,14
	6. Počet eutektických buněk na L2max	99	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	počet eut. buněk na grafitickou expanzi L2max-L1min	100	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	101	0,38
	rychlost stoupání D křivek na graf. exp. L2max-L1min	102	0,84
	8. Množství eutektických buněk na sklon litiny k zákalce	104	0,57
VŠ LČG LKG (BŠ)	1. Množství modifikátoru a očkovadla na L2max	107	0,44
	množství modifikátoru a očkovadla na grafit. expanzi	108	0,51
	2. Licí teplota na L2max	109	0,1
	3. Kvalita grafitu na L2max	/	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	kvalita grafitu na grafitickou expanzi L2max	/	0 (výrazný rozptyl hodnot)
	4. Chemické složení na L2max	110	0,2
	Mg na L2max	111	0,55
	Mg na grafitickou expanzi L2max-L1min	112	0,55
	5. Délka eutektické reakce na L2max	113	0,48
	délka eut. reakce na grafitic. expanzi L2max-L1min	114	0,38
	6. Počet eutektických buněk na L2max	115	0,92
	počet eut. buněk na grafitic. expanzi L2max-L1min	116	0,38

	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	117	0,55
	rychlost stoupání D křivek na graf. exp. L2max-L1min	118	0,75
	8. Množství eutektic. buněk na sklon litiny k zákalce	/	0,03

zkoušky	posuzovaný vliv	obr.č.	hodnota spolehlivosti R^2
kokila (K)	1. Předehřátí kokily na L2max	140	malé množství hodnot
	2. Předehřátí kokily na grafitickou exp. L2max-L1min	141	malé množství hodnot
	3. Grafitická expanze na celkovou expanzi L2max	142	malé množství hodnot

VŠ -LLG	Grafitická exp. L2max-L1min na celkovou exp. L2max	143	0,73
VŠ -LKG	Grafitická exp. L2max-L1min na celkovou exp. L2max	144	0,73

VŠ -LLG	množství aktivního kyslíku na celkovou exp. L2max	145	malé množství hodnot
VŠ -LKG	množství aktivního kyslíku na graf. exp. L2max-L1min	146	malé množství hodnot

Sériové odlitky

zkoušky	posuzovaný vliv na vady u sériových odlitků	obr.č.	hodnota spolehlivosti R^2
brzdový buben LLG (AB)	1. Množství a druh očkovadla	119	0,46
	2. Licí teplota	120	0,15
	3. Kvalita grafitu	121	0,3
	4. Chemické složení	/	nebylo posuzováno
	5. Délka eutektické reakce	122	0,63
	6. Počet eutektických buněk	123	0,4
	souvislost počtu EB mezi zkuš. a sériovými odlitky	124	0,7
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	/	0,02
	8. Množství eutekt. buněk na sklon litiny k zákalce	125	0,2
	9. Maximální expanze L2max	126	0,04
	10. Grafitická expanze L2max-L1min	127	0,06
řošt LČG (BR)	1. Množství a druh očkovadla	128	malé množství hodnot
	2. Licí teplota	129	malé množství hodnot
	3. Kvalita grafitu (% kuliček)	130	malé množství hodnot
	4. Chemické složení (Mg)	/	malé množství hodnot
	5. Délka eutektické reakce	131	malé množství hodnot
	6. Počet eutektických buněk	132	malé množství hodnot
	souvislost počtu EB mezi zkuš. a sériovými odlitky	133	malé množství hodnot (0,91)
	7. Rychlost stoupání D křivek na L2max	/	malé množství hodnot
	8. Množství eutekt. buněk na sklon litiny k zákalce	134	malé množství hodnot
	9. Maximální expanze L2max	135	malé množství hodnot
	10. Grafitická expanze L2max-L1min	136	malé množství hodnot

zanedbatelná spolehlivost $R^2 = 0 - 0,39$

nezanedbatelná spolehlivost (trend) $R^2 = 0,4 - 0,69$

výrazná spolehlivost (vliv) $R^2 = 0,7 - 1$

Čísla obrázků odpovídají značení v dizertační práci.

5. Závěr

V rámci řešení doktorské práce byla použita řada laboratorních i provozních metod : dilatační a termická analýza, chemická analýza, optická metalografie, defektoskopické zkoušky, zkouška ultrazvukovým tloušťkoměrem, matematické metody derivace změřených průběhů sledovaných dějů, prokládání trendové funkce se stanovením jejího maximálního stupně spolehlivosti a další. Na základě uvedených výsledků a získaných poznatků lze formulovat následující dílčí závěry:

1) Byla provedena laboratorní i praktická měření na zkušebních odlitcích : *válcové tyče válcového špalku* a v uvedených případech byly zároveň ze stejné taveniny vyrobeny sériově: *brzdový buben ŠKODA* (LLG) a *rošt ŠKODA* (LČG).

2) Pro měření dilatačních dějů probíhajících během tuhnutí a chladnutí sekundárně upravených tavenin byl s úspěchem odzkoušen přístroj CZAH DO-1 spolu s konstrukcí zkoušky (VŠ) podle NANDORIHO

3) Výsledky měření u LLG neprokázaly jednoznačnou a přímou vazbu mezi množstvím grafitizačního očkovadla a grafitickou expanzí L2max – L1min, či celkovou maximální expanzí L2max.
U LČG, LKG byla tato relativní závislost nalezena a vliv většího množství grafitizačního očkovadla spolu s větším množstvím modifikátoru se pozitivně odrazil v menší hodnotě jak na grafitické expanzi L2max– L1min, tak i na celkové maximální expanzi L2max.

4) Byl zjištěn odlišný a relativně malý vliv licí teploty u jednotlivých typů litin.
U LLG je vliv vyšší licí teploty relativně pozitivní na nižší hodnoty maximální expanze L2max a omezuje vznik vnitřních vad odlitků, na rozdíl od LČG,LKG kde byl zjištěn trend negativní.

5) Vzhledem k velkému rozptylu dilatačních hodnot grafitické expanze u LLG je pravděpodobné, že zde má významnou roli kvalita a kvantita zárodků v tavenině, předurčená skladbou vsázky, tavícím agregátem, režimem tavení, stupněm přehřátí taveniny a dobou setrvání na ní. Absence vhodných podkladů a údajů o stavu zárodků neumožnila bližší hodnocení tohoto důležitého vlivu na průběh dilatace tuhnoucích tavenin.

6) Byla zjištěna relativní souvislost délky eutektické reakce a počtu eutektických buněk, jak s hodnotami maximální expanze a hodnotami grafitické expanze, tak s výskytem vad v odlitcích na základě grafitického očkování tavenin.
U LLG je vyšší počet eutektických buněk nevýrazně, mírně negativní faktor a zvyšuje maximální expanzi L2max spolu se vznikem vnitřních vad odlitků. U LČG, LKG byl zjištěn trend právě opačný.

7) Výsledky měření na dilatometru společně s množstvím nalezených vnitřních vad u sériových odlitků odlévaných do forem s JBFS prokázaly jejich relativní spojitost s vlivem sekundárních úprav tavenin.
U LLG byl nalezen negativní vliv většího množství grafitizačního očkovadla, na rozdíl od LČG, LKG , kde byl vliv většího množství grafitizačního očkovadla zároveň s větším množstvím modifikátoru trendově pozitivní.

Autorovy publikované práce se vztahem k tématu dizertační práce

1. SKRBEK B. VODIČKA P.: Zkušenosti s provozováním ultrazvukové rychlozkoušky účinku modifikátoru. Konference „Očkovadla a předslitiny, sborník, INPEKO Žilina, 1991, str. 112 – 118.
2. EXNER, J., JELÍNEK, M., VODIČKA, P., KONEČNÝ, L., VRBA, M., HOŠEK, Z.: Hodnocení metalurgické jakosti litiny s kuličkovým grafitem. 15.celostátní konference "Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem" . Svratka 26. Až 28. 11. 2001. s. 178-185. ISBN 80-02-01464-2
3. VODIČKA, P., HOŠEK, Z.: Setkání komise 7.1 a 7.4 CIATF, TU Liberec KST 28-29.5.2002

Použitá literatura :

[1] ELBEL T. a kolektiv : Vady odlitků ze slitin železa . MATECS Brno 1992
[2] VETIŠKA A. a kol. : Teoretické základy slévárenské technologie. SNTL/ALFA Praha 1972
[3] VONDRÁK V. : Technologie litinových odlitků. Henry Kyncl , TURNOV PSČ 511 01 skripta 1998
[4] PÍŠEK F. – PLEŠINGER A. : Slévárenství – I , Obecná část . SNTL , Praha 1974
[5] PAVLÍK I. : Výzkum činitelů ovlivňujících vznik ředin a staženin v odlitcích ze šedé litiny. SVUM Brno 1975
[6] GEDEONOVÁ Z. : Dlžkové zmeny při tuhnutí grafitických liatin a výsledná kvalita odlitku. Slévárenství č.9 2001, strana 513 – 523.
[7] DÚL J., NÁNDORI G., SZALAI G., GEDEONOVÁ Z. : Einfluss verschiedener Formstoffparameter auf die Massänderungen von Abgussen aus Gusseisen wahrend der Erstarrung. Giesserei-Praxis 2/01, strana 75 – 80.
[8] SÝKORA P. : Použití karbidu křemíku při výrobě LLG a LGG, Slévárenská ročenka 1999, stana 154 – 163, Česká slévárenská společnost.
[9] HUMMER R. : Beurteilung der Lunkerneigung von Gusseisen mit Kugelgraphit mittels Abkühl- und Längenänderungskurven, Giesserei-Praxis, 9/10-1989, stana 142 – 151.
[10] WOLF G. : Vývojové trendy při výrobě litiny, Slévárenství, XLIII,1995 č. 5 , strana 284-290.
[11] KRUTZNER F., PACYNA H., DOPP R. : Möglichkeit und Grenzen des speiserlosen Giessen bei Gusseisen. Giessereiforschung 50 , 1998 Nr.1, strana 25-28.
[12] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 1. Einfluss des Formstoffes auf die Formwandbewegung bei zylindrischem Formhohlraum. Giesserei 60 (1973) č. 21, strana 669-675.
[13] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 2. Einfuss von Gestalt und Verdichtung der Sandform auf die Bewegung der Formwand. Giesserei 60 (1973) č.21, strana 676 - 681.
[14] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 3. Formstaffeinfluss beim Giessen und Erstaren von Gusseisen mit Lamellgraphit. Giesserei 60 (1973) č. 23, strana 725 – 731.
[15] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 4. Metalleinfluss beim Giessen und Erstarren von Gusseisen mit Lamellengrap. in Sandformen. Giesserei 60 (1973) č. 26, strana 832 - 838.
[16] BOENISH D., ENGLER S., KOHLER B. : Teil 5. Metalleinfluss beim Giessen und Erstarren von Aluminium-Kupfer-Legierung und AlSi12,5 in Sandformen. Giesserei 60 (1973) č. 26, strana 839 - 843.
[17] JELÍNEK P., VONDRÁK V. : Studie stahování litin II. a III. Výzkumná zpráva, VŠB Ostrava, Katedra slévárenství, 1975.
[18] HAVLIČEK F.: Kapitoly z teplofyziky odlitku a formy.VŠBOstrava,Katedra slévárenství1970.
[19] NÉMETHOVÁ P. : Sledování teplotních polí po odlití v systému litinová kokila – odlitek tvaru desky. Diplomová práce, TU – Liberec,1992.
[20] ŠLAHORA P. : Stanovení významu obsahů a druhů vazeb kyslíku na výskyt charakteristických vad v odlitcích z litiny. Výzkumná zpráva. SVÚM a.s. Brno, 1998.
[21] KONEČNÝ L., EXNER J., NOVÁ I. : Aktivita kyslíku u grafitických litin. Závěrečná zpráva

grantového projektu, GA ČR 106/95/0171, TU Liberec, 1998.
[22] JELÍNEK M. : Kvantifikace vlivu aktivity kyslíku na strukturu a vlastnosti grafitických litin. Disertační práce, TU Liberec, 2002.
[23] SOČENKO O. : Agregativnyj mechanizm formirovanija grafita v ČŠG, Izvestija vysšich učebnych zavedenij, Černaja metallurgija, 8, 1990, str. 71-74.
[24] KARSAY S.: Ductile Iron I – Production, Qit – Fer Et Titane Inc.,Montreal,1976.
[25] ŠENBERGER J.:Kyslík v litinách během jejich výroby a jeho vliv na vlastnosti litin, In: 14. celostátní konference Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem, Brno, září 2000, stra. 34 –41.
[26] BASDOGAN M., BENNET G., KONDIC V. : Effects of Sulphur and Oxygen on Solidification of Grey Cast Iron, University of Birmingham, Department of Metallurgy, 1989,str. 240 – 247.
[27] HUMMER R . : Praktische Anwendung der Sauerstoffaktivitätsmessung zur Qualitäts-sicherung von Schmelzen für Gusseisen mit Kugelgraphit. Giesserei, 1991/24, str. 884 – 889.
[28] EXNER J. : Nepublikované podklady výsledků studia vývoje výroby bloků motorů LIAZ ze šedé a legované litiny ČSN 42 2425. LIAZ 04 Slévárna Ostašov, Liberec, 1970 – 1989.
[29] HOMOLA M.,ČECH J., SOCHOR S. : Optimalizace slévárenské technologie ve slévárně ŽĎAS a.s. , Žďár nad Sázavou pomocí programu firmy MAGMA. Slévárenství číslo 6, 1995, strana 392 – 396.
[30] BAŘINOVÁ D., BALOUN A.: Program MAGMASOFT šetří miliony. ŠKODA MOBIL číslo 13, 1999, strana 3.
[31] HAVLÍČEK F. : Teorie slévárenství. Výběr přednášek, VŠB Ostrava, Fakulta FMNI, 1992.
[32] VONDRÁK V. : Sekundární metalurgie litin. Výběr přednášek. VŠB Ostrava, Fakulta FMMI, 1994.
[33] CZIKEL J. : Die Kugellunkerprobe. Freiberg Forschungshefte. 4. Giessertagung. Díl 1.Strana 209 – 226, 19. –20. 5. 1958.
[34] CZIKEL J. : Über das Lunkerverhälten von grauem Gusseisen. 4. Giessertagung. Díl 2. strana 12 – 21, 19. – 20. 5. 1958.
[35] VONDRÁK V. : Sekundární metalurgie litin. VŠB Ostrava. FMMI, 1996
[36] DRÁPAL S. : Tepelné zpracování litinových odlitků. SNTL, Knižnice strojírenské výroby 121, Praha 1966.
[37] ELKEM ASA : Odborná dokumentace k nabízeným očkovadlům firmy Elkem. z Norského originálu přeložila firma METOS s r.o. Chrudim, 2000.
[38] ROUČKA J. : Metalurgie litin. Učební texty,VUT – Brno, FS, PC-DIR sro. 1998.
[39] PIWOWARSKY E. : Hochwertiges Gusseisen, seine Eigenschaften und die physikalische Metallurgie seiner Herstellung. Berlin, Springer – Verlag. 1942.
[40] ROUČKA J. : Použití termické analýzy pro hodnocení struktury slitin Al –Si. Habilitační práce. VUT Brno. 1996.
[41] PŘIBYL J., VONDRÁK V.: Studium stahování tvárné litiny. Výz.zpráva. VŠB Ostrava, 1967.
[42] VONDRÁK V., BENEŠ J.: Komplexní rozbor očkování šedé litiny . Výzkumná zpráva VŠB Ostrava, 1970.
[43] LEVELINK H.G.: 8. odborná přednáška na 39. MSK Filadelfie, 1972.
[44] PLEŠINGER A.M.: Vady odlitků ze šedé litiny . Praha 1952.
[45] ANDERSON J., GERHARDT P., FORREST R., RODTER H.:Litina s kuličkovým grafitem. Nejdůležitější o vtokové soustavě a nálitkování. QIT-Fer et Titane Inc. Montreal, Kanada, Vydavatel pro SR a ČR Fompex s.r.o., bez udání roku.
[46] SKOČOVSKÝ P., MATEJKA M.: Mikroštruktúra liatin. Metalografická příručka. Fompex s.r.o. Edičné stredisko VŠDS. Žilina ,1994.
[47] KÖHLER B. : Formwand und Metallwandbewegungen beim Giesvorgang und wahrend des Erstarrens von Guseisen in Sandformen. Disertační práce. Aachen. 1971.
[48] HOUŠŤ M. : K problémům staženin a ředin u odlitků ze šedé litiny.Slévárenství 1964, číslo 9,

strana 352 – 356.
[49] SKRBEK B. VODIČKA P.: Zkušenosti s provozováním ultrazvukové rychlozkoušky účinku modifikátoru.Konference „Očkovadla a předslitiny,sborník, INPEKO Žilina,1991,str.112-118.
[50] HORÁK L., HÁLA M.: Současný stav provozní kontroly jakosti šedé litiny pomocí termické analýzy ve slévárnách oborového podniku ŠKODA (Plzeň).Výzkumná zpráva č. 715 – 091 – 2151/7. Plzeň 1980.
[51] JURA S. BOREK H. SAKWA J. : Differential analysis of the process of cast iron solidification. 46 th international foundry congres. Polonia. 1979.
[52] HRIBOVSEK B.J., MARINCEK B.: Thermal analysis of bulk solidified cast iron melts. Institut der metallurgie. Eidgenóssische Technische Hochschule Zurich. Str. 659 – 672. 1975
[53] HAMPL J., VONDRÁK V., VÁLEK T.: Objemové změny litiny s lupínkovým grafitem, jako funkce parametrů ochlazovací křivky. TU Ostrava, Katedra slévárenství, Sborník meznárodní konference Spolupráce 2002, str. 107-111.
[54] VONDRÁK V., PAVLÍČKOVÁ M.: Vliv aktivity uhlíku a křemíku na průběh očkování litin a hloubku zákalky. TU Ostrava, Katedra slévárenství, Sborník mezinárodní konference Spolupráce 2002 , str. 113 – 117.
[55] GEDEONOVÁ Z., DÚL J.: Dížkové zmeny pri tuhnutí grafitických liatin a výsledná kvalita odliatkov. HF TU Košice, Katedra metalurgie železa a zlievárenstva, Sborník mezinárodní konference Spolupráce 2002, str. 127 – 134.
[56] NOVÁ I.: Tepelné pochody ve slévárenských formách. TU Liberec, Katedra strojírenské metalurgie, 2000.
[57] KONEČNÝ L., JELÍNEK M.: Stanovení optimální modifikace hořčíkem tvárných litin pomocí měření aktivit kyslíku. In.: 8. Mezinárodní metalurgický veletrh a symposium. Metal99, Ostrava 1999, strana 260 – 268.
[58] NOVÁ I., EXNER J., KALINA M. : Simulace tuhnutí jako účinný nástroj řešení homogenity odlitků. Slévárenství č. 4, 2000, strana 203 – 206.
[59] MORES A.: ,Řediny a staženiny u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem a způsoby jejich hodnocení. Slévárenská ročenka 2001, strana 128 – 138.
[60] KOCHEISEN K.: Volumenfehler bei Guseisen mit Lamellen und Kugelgraphit Giesserei – Forschung č.1, ročník 24, 1972, strana 27 – 37.
[61] UNGERMAN J.: Řediny a nedodržení tvrdosti u odlitků ze šedé litiny a způsoby zabránění těmto vadám. Slévárenství č. 11, 1971, strana 471 – 473.
[62] NANDORI G. : Charakteristika litějnoj doperlitnoj usadki serovo čuguna Litejnoej proizvodstvo č. 11, 1963, strana 32 – 35.
[63] BRADÍK J.: Výzkumná zpráva o litinách , SVÚM Z – 59 – 739.
[64] GORENKO V., KOMPANIČENKO V., RAZDOBARINI. : Litějnaja usadka belovo polovinčatovo i serovo čuguna s plastinčatym grafitom. Liteinoje proizvodstvo č.2 , 1975, strana 10 – 12.
[65] CZAH – Pomiar Spolka z o.o.: Dylatometr odlewniczy DO-1., návod , Katovice. 2001.
[66] CZAH – Pomiar Spolka z o.o.: CRYSTALDIGRAPH PC-2T. A/D převodník, návod k použití. Katovice . 2001.
[67] SKRBEK B.: Nedestruktivní diagnostika vlastností litin. Slévárenství č. 8 – 9, ročník XLVII, 1999, strana 505 – 508.
[68] HAVLÍČEK F. : Studium tepelně-fyzikálních vlastností formy. Slévárenství č. 9, ročník XVII, 1969, strana 366 – 372.
[69] PÍŠEK Fr. : Nauka o materiálu II., ČSAV, Praha 1956, str.: 533 – 540.
[70] GEDEONOVÁ Z., JELČ I.: Metalurgia liatin, HF, TU Košice, 2000.
[71] NOVÁ I. : Tepelné procesy ve slévárenských formách, TU Liberec, 2002
[72] Hodnocení metalografické struktury litin EN ISO 954 (dříve ČSN 42 0461)
[73] HAMPL J., VÁLEK T., VONDRÁK Vl. : Objemové smrštění litin mezi teplotou lití a tuhnutí. Slévárenství č. 4-5 2003, str. 186 – 189.

Resumé

Disertační práce se zabývá vlivem podmínek grafitizace litin (LLG, LČG, LKG) na vznik ředin a staženin v odlitcích litých do netrvalých pískových forem.

V úvodní části jsou shrnuty současné poznatky o vzniku a průběhu vad homogenity. Ty jsou doplněny o vliv jednotlivých parametrů mezi než patří : chemické složení slitiny, odlévací teplota, sekundární zpracování taveniny, materiál netrvalé slévárenské formy a řada dalších. Za velmi důležité jsou považovány tepelně-fyzikální vlastnosti kovu i slévárenské formy, které celý průběh tuhnutí taveniny zásadním způsobem determinují. V současné době se tyto znalosti využívají společně s výpočetní technikou pro tvorbu simulačních výpočtů, které již v přípravné fázi dokáží s určitou pravděpodobností odhalit vnitřní vady odlitků.

S pomocí zařízení ke sledování dilatací tuhnoucí taveniny byly u zkušebních odlitků válcové tyče (tepelné uzly v horizontální ose odlitku) a válcového špalku (tepelný uzel ve vertikální ose odlitku) vyhodnoceny průběhy dilatačních a teplotních křivek uvedených typů litin. Změřené hodnoty grafitické a celkové expanze byly systematicky porovnávány a graficky vyhodnoceny s činiteli ovlivňujícími či souvisejícími s grafitizací, jako jsou : množství a druh očkovadla, odlévací teplota, charakteristika grafitu ve ztuhlém odlitku, chemické složení litiny, doba trvání eutektické reakce, počet eutektických buněk, rychlost stoupání dilatačních křivek při grafitické expanzi a sklon litiny k tvorbě zákalky.
Pro porovnání laboratorních zkoušek byla provedena i provozní měření společně se sériovými odlitky brzdového bubnu (LLG) a roštu (LČG).

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že nebyl nalezen významný přímý vliv či jednoznačný parametr určující výskyt a velikost vnitřních vad odlitků. Vedle nevýrazného vlivu odlévací teploty či typu vyloučeného grafitu má vliv množství a druh očkovadla, počet eutektických buněk a doba trvání eutektické reakce trendový charakter. Výrazná souvislost byla potvrzena jen u vlivu grafitické expanze na celkovou expanzi dilatující tuhnoucí taveniny.
Při zkoumání vlivu grafitického očkování na výskyt vnitřních vad v odlitcích odlévaných do JBFS byl u LLG nalezen jeho negativní vliv. U LČG, LKG byl při sekundárním grafitickém očkování nalezen vliv naopak pozitivní.

Pro jednoznačnější a souhrnné hodnocení je do budoucna nutné sledovat a zvlášť vyhodnotit také vlivy skladby vsázky, vedení tavby a typu tavícího agregátu, které se dle obecných zkušeností mohou výrazně, často však i protichůdně, projevovat na tvorbě a stavu zárodků v tavenině. Praktické zkoušky by měly být doplněny o měření množství aktivního kyslíku v tavenině.

Klíčová slova : Litina, očkování, modifikace, grafitická expanze, dilatace

Digest

The dissertation deals with the influence of the conditions for the graphitisation of cast iron (grey cast iron, vermicular cast iron, ductile iron) on the occurrence of shrinkage porosity and shrinkage cavities in castings made using silica-bonded sand moulds.

The introductory part summarises the existing knowledge base about the occurrence and progress of homogeneity defects. These are supplemented with the influence of parameters among which also rank: the chemical composition of the castings, pouring temperature, secondary processing of molten metal, material of the sand moulds and many others. Quite important are the thermo physical characteristics of the metal and the mould that in a fundamental way determine the progress of the solidification of the molten metal. At present this knowledge is used in conjunction with computer technology to create simulation calculations that already at the preparatory phase can with a certain probability uncover the internal defects of the castings.

Progress of the dilatation and temperature curves of the given types of castings for trial castings of cylindrical bars (thermal node in the horizontal axis of the casting) and cylindrical blocks (thermal node in the horizontal axis of the casting) were evaluated with the aid of equipment for monitoring the dilatation of the solidifying molten metal. The measured values of graphite and general expansion were systematically compared and graphically evaluated with the parameters influencing or related to graphitisation, such as: quantity and type of inoculant, pouring temperature, characteristics of the graphite in the solidified casting, chemical composition of the cast iron, duration of the eutectic reaction, number of eutectic cells, speed of the rise of the dilatation curves during graphitic expansion and chill depth tendency of the cast iron. For comparison of the laboratory tests, a parallel practical measurements of the castings of breaking drums (grey cast iron) and bearing frame (vermicular cast iron) were also performed.

From the ascertained results, it follows that no major direct influence or unambiguous parameter that determines the occurrence and size of the internal defects of the castings was found. Apart from the inconsequential influence of the pouring temperature or type of graphitic deposit, the volume and type of inoculant, number eutectic cells and duration of the eutectic reaction have a trend character. Pronounced contiguity was confirmed only for the influence of graphitic expansion on the general expansion of the dilating solidifying molten metal.

When examining the graphitic inoculation of the grey cast iron, its negative influence was found. Unlike by vermicular cast iron, ductile iron secondary graphitic inoculation had a positive influence on the occurrence of internal defects.

For better summary evaluation, in future it will be essential to monitor and especially evaluate also the influence of the composition (structure) of the melting charge, control of the melting process and type of melting aggregate that according to general experience may substantially, but also often also negatively manifest themselves in the creation and state of nuclei in the molten iron. Practical tests should be supplemented with the measurement of the volume of active oxygen in the molten iron.

Keywords: cast iron, inoculation, modification, graphitic expansion, dilatation