

VNITŘNÍ PORUCHY MATERIÁLŮ ODLITKŮ

František HAVLÍČEK, Petr KOZELSKÝ, Pavel SZROMEK
VŠB-TU Ostrava, FMMI, katedra slévárenství,
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava, ČR

Úvod

Hlavním představitelem vnitřních poruch souvislostí materiálů odlitků jsou *trhliny*, vznikající při vysokých teplotách a *praskliny*, jejichž výskyt je při teplotách nižších, nejčastěji až při úplném vychladnutí odlitku. Nebezpečnost těchto vad spočívá v tom, že jsou obtížně identifikované a neopravitelné, takže odlitek znehodnocují.

Jejich rozlišení, jde-li o trhlinu nebo prasklinu, je možno určit podle charakteru lomu. U trhliny je lom hrubý, interkrystalický kamenitého vzhledu, bez náběhových barev, u praskliny je lom jemnozrný, transkrystalický, houževnatý.

Vnitřní trhliny

Trhlinou rozumíme porušení souvislosti materiálu, postupující po hranicích primárních zrn. Trhlina je tudíž charakterizována interkrystalickým lomem, což je jedním z důkazů jejího vizuálního určení. Druhým důkazem trhliny je její křivolaký průběh.

Trhliny vznikají po ztuhnutí odlitku, ještě při vysokých teplotách kovu, ve druhé fázi režimu chladnutí. V této době chladnou rychleji vnitřní oblasti odlitku (obr. 1b, křivka kř. 5, odlitek Ø550 mm, doba tuhnutí 83 min.) a jsou namáhány plastickými deformacemi v tahu. Průběhem těchto deformací však dochází k jejich vyčerpání a ke zpevnění materiálu. Plastickými deformacemi totiž vzrůstá počet dislokací a při jejich vysoké hustotě si navzájem omezují pohyblivost [1], čímž se stěžuje další vlastní průběh těchto deformací, takže k jejich dalšímu průběhu je nutné opět vyšší deformační napětí [6]. Za těchto podmínek se v centrální části odlitku, v důsledku jejího stálého intenzivního chladnutí a tím i smrštění (viz kř. 5 na obr. 1b), vyvíjí podélné (osové) napětí a nemůže-li proběhnout již zmíněná plastická deformace (nebo její průběh je silně omezen), může toto napětí vyvolat v osové oblasti příčnou trhlinu.

Jak ukazují experimentální výsledky měření pevnostních a plastických vlastností kovů za vysokých teplot, podmínky pro vznik trhlín jsou v té době v odlitku příznivé. Podle našich měření [12, 14] má ocel při teplotě krystalizace pevnost v tahu kolem cca 8

MPa a s poklesem teploty a s obsahem uhlíku pevnost v tahu vzrůstá, jak ukazuje obr. 2a. Uhlík svým vlivem na pevnostní vlastnosti (i při vysokých teplotách) převyšuje ostatní prvky. Zřetelný rozptyl hodnot pevností jednotlivých typů ocelí v závislosti na teplotě nastává do teplot 1100 °C; nad touto teplotní hranicí až do teploty nulové pevnosti (teplota solidu) není mezi nimi rozdíl v pevnosti v tahu. Byly zkoumány ocele (pořadí podle obsahu C):

a) běžná nízkouhlíková ocel pro výrobu odlitků ČSN 422633 (0.20 % C, 0.7 % Mn), jejíž teplota nulové pevnosti (při bodu solidu) nastává při teplotě 1450 °C;

b) manganová, velmi používaná ocel na dolitky ČSN 422712 (0.26 % C, 1.06 % Mn); nulové pevnosti dosaženo při teplotě 1445 °C;

c) středněuhlíková ocel ČSN 422650 (0.39 % C, 1.06 % Mn) na odlitky; teplota nulové pevnosti 1438 °C;

d) ocel ČSN 422719 s křemíkem (0.55 % C, 0.69 % Mn, 0.71 % Si), doporučená pro vyšší namáhání; teplota nulové pevnosti při 1406 °C;

e) ocel ČSN 422711, manganová ořezuvzdorná; nulové pevnosti bylo dosaženo při 1407 °C.

Průběh plasticity při vysokých teplotách výše uvedených ocelí ukazuje obr. 2b. Výsledky experimentálních měření ukazují závislosti průběhu plasticity tuhneoucího a dále chladneoucího kovu, které umožňují objasnit vznik vnitřních poruch souvislosti materiálu odlitku při jeho tuhnutí. Z obr. 2b vyplývá, že ocel v okamžiku ztuhnutí nemá plasticitu, je tudíž křehká a proto k porušení souvislosti může dojít při zcela nízkém napětí křehkým lomem. Označujeme ji jako **teplotu primární křehkosti**. Trhlina probíhá po hranicích zrn, lom je interkrystalický a hrubý. Praxe potvrzuje vznik takového hrubého až kamenitého charakteru lomu u odlitku. Trhlina se může dále rozvíjet vlivem lineárního i gravitačního smrštění a z toho vzniklým tahovým pnutím v osové části odlitku a to co do šířky a rozsahu průřezu.

Z výsledku měření dále vyplývá, že s poklesem teplot odlitku z bodu solidu v malém teplotním intervalu cca 10 °C, vzroste náhle plasticita až na 100 % hodnoty. Doba trvání tohoto stavu materiálu s maximální plastičností, při dalším chladnutí závisí na době vyčerpání plastických deformací a je určena teplotou, při které plasticita opět klesá, takže materiál má při dalším chladnutí náběh ke křehkému porušení. Tato teplota je pro každou ocel různá a je závislá na chemickém složení. Označujeme ji jako **teplotu sekundární křehkosti**. U oceli jakosti 422633 dochází k významnému poklesu plasticity, tedy k sekundární křehkosti při teplotě 1100 °C v teplotním intervalu až do teploty 860 °C, u ocele 422712 je to 1137 °C, u ocele 422650 to činí 1200 °C. Ocele 422719 a 422711 s vysokým obsahem uhlíku mají shodný průběh plasticity a křehkosti: sekundární křehkost při teplotě 1200 °C s poklesem plasticity do 1000 °C a terciální průběh křehkosti při teplotě 820 a 830 °C.

Průběh pevnosti v tahu litin – s kuličkovým grafitem ČSN 422305 a litiny s lupínkovým grafitem ČSN 422425 při vysokých teplotách ukazuje obr. 3a. Pevnost s teplotou klesá u obou materiálů téměř rovnoměrně, s tím rozdílem, že litina s kuličkovým grafitem vykazuje v celém teplotním režimu více než dvojnásobnou pevnost oproti litině s lupínkovým grafitem. V oblasti krystalizace pak dochází k náhlé ztrátě pevnosti a soudržnosti.

Plasticita obou litin je na obr. 3b. Z výsledků je zřejmé, že její průběh u litiny s kuličkovým grafitem je shodný s ocelí. Uvažujeme-li děj od teploty krystalizace, tak jak tuhne a chladne odlitek, potom při teplotě solidu nevykazuje tato litina opět žádnou plasticitu a porušení vzorku nastává zcela křehkým lomem. Ochlazením o cca 10 °C vzorek vykazuje plasticitu již 30 %, přičemž dalším chladnutím nerovnoměrně stoupá až do 50 % při teplotě 1000 °C, kterou lze označit jako teplot sekundární křehkosti, při které plasticita klesá. Rozdíl oproti oceli je v nižších hodnotách plasticity.

Plasticita litiny s lupínkovým grafitem je z technického hlediska zcela zanedbatelná.

Vnitřní trhlinka vychází ze *středu průřezu*, v kolmém směru na hlavní (delší) osu odlitku. Podle stavu napjatosti pevnostních a plastických vlastností materiálu, stavu hranic zrn a podobně, může mít trhlinka rozdílnou velikost v průřezu odlitku, v krajním případě zasahuje jeho celý průřez [8, 11]. Trhlinka většího rozsahu nevzniká najednou, ale postupně se rozvíjí. Na obr. 4a je případ, kdy trhlinka s hrubou strukturou zasahuje v odlitku válce pouze vnitřní středovou část průřezu. Vnější, jemný, houževnatý lom na průřezu vznikl zlomením válce na trati. Na obr. 4b je trhlinka s hrubou kamenitou strukturou, jdoucí přes celý průřez ocelového válce a představuje vznik úplné vnitřní příčné necelistvosti.

Praxe i teorie potvrzují, že náchylnost ke vzniku vnitřní trhlinky je vyšší při větším průřezu a délce odlitku, vyšším obsahu uhlíku a legujících prvků v oceli a vyšší intenzitě ochlazování odlitku ve formě i při tepelném zpracování.

Vnitřní praskliny

Podobně jako trhliny, vznikají v odlitcích i vnitřní praskliny, ovšem v teplotní oblasti převládajících pružných deformací [3, 5], tedy v oboru *nízkých teplot*. Vyskytují se v osové části masivního odlitku, nebo v odlitcích tuhé konstrukce s rozdílnou tloušťkou stěn s omezenou deformační schopností [3, 11]. Příčinou těchto vad porušení souvislosti materiálu jsou vnitřní zbytková napětí [9, 3], která jsou ve střední části masivního odlitku v době chladnutí *tahová*. V některých případech mohou být zvýšena ještě o napětí dočasná [11].

Vnitřní trvalé napětí je dáno vztahem:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

kde značí:

α - součinitel tepelného smrštění (roztažnosti) (1/°C)

E - modul pružnosti materiálu odlitku (MPa)

ΔT - teplotní gradient v průřezu stěny nebo mezi tenkou a masivní stěnou (°C).

Teplotní gradient ΔT je vyznačen na obr. 4 v okamžiku τ_2 , kdy celý průřez odlitku dosahuje při chladnutí kritické teploty T_{kr} a nachází se v pásmu elasticko-plastických deformací (mezi teplotami T_x a T_y). Protože při dalším chladnutí dochází v této oblasti ještě k určitému průběhu plastických deformací a tím k uvolnění (snížení) hodnoty

skutečného napětí, je vypočtené napětí vždy vyšší; proto se zařazují do vztahu (1) koeficienty snižující jeho hodnotu [3, 7, 14]:

$$\sigma = E\alpha\Delta T(1 - \delta) \quad (2)$$

kde δ má nižší hodnotu než 1 (0,25 až 0,45) podle typu odlitku, nebo vztah:

$$\sigma = \frac{\alpha E}{S(1 - \mu)}\Delta T \quad (3)$$

kde S má vyšší hodnotu než 1 (1,4 až 2),
 μ je Poissonova konstanta.

Vlivy působící na hladinu napětí v odlitku

Omezení vzniku vnitřních poruch souvislosti je problémem *vnitřních pnutí* v odlitku a jejich snížení. Hladina napětí souvisí s řadou činitelů, na př. intenzitou chladnutí odlitku, s chemickým složením materiálu s konstrukcí a hmotností odlitku. Při rychlém chladnutí vznikají v odlitku větší rozdíly teplot a zbytková napětí jsou vyšší. Rovněž tak s vyšším obsahem uhlíku, křemíku a legujících prvků. U těchto materiálů je nižší tepelná vodivost, čímž vznikají opět vyšší rozdíly teplot v chladnoucím odlitku. Mají vyšší modul pružnosti E , vyšší tvrdost, křehkost a nižší plastičnost. To vše jsou příčiny vyšší hladiny vnitřních pnutí a náchylnosti odlitku k prasklinám.

V přímé závislosti je hodnota napětí také spojena s konstrukcí odlitku a to jak na *velikostním činiteli*, tak na *tvaru* odlitku. Největší vnitřní napětí je v odlitcích masivních, jednoduchých tvarů, prostých jakékoliv tvarové deformační schopnosti. Dále pak v odlitcích tuhé konstrukce s velkými rozdíly tloušťky stěny [14].

Tenzometrická měření na pokusných odlitcích ukazují (obr. 5), že trvalá napětí v tenkých stěnách (nebo v povrchových vrstvách) jsou tlaková a v tlustých stěnách, nebo ve středních částech masivních odlitků jsou napětí tahová. Napětí dále vzrůstá s rychlostí tuhnutí a ochlazování odlitků.

Prasklina je vůči trhlině téměř rovná a lomová plocha vykazuje jemnou houževnatou strukturu, což také potvrzuje její vznik při nízkých teplotách, nebo v době úplného vychladnutí odlitku.

Jednou z nekonvenčních metod, kterou je možno sledovat vznik a další vývoj napětí a vznik poruchy souvislosti materiálu odlitku v kterékoliv jeho výrobní fázi, je akustická emise [3]. Nevyjadřuje napětí v MPa, ale podává obraz o jeho charakteru a hlavně hodnotou četnosti emisních pulsů, které se snímají, udává změnu a výši napětíového stavu v průběhu procesu chladnutí nebo náhřevu odlitku. Při sledování tohoto děje na obrazovce, lze úpravou tepelného režimu, hlavně při TZ nebo při upalování nálitku kysliko-acetylenovým hořákem, stav napjatosti řídit. Zcela průkazně lze touto metodou zaznamenat vznik trhliny a praskliny.

Závěr

Vnitřní poruchy souvislosti materiálu odlitků jsou z ekonomického hlediska velmi nebezpečnými vadami, protože jsou obtížně zjištělné a neopravitelné, takže zcela znehodnocují většinou drahý odlitek. Jejich vznik je složitou problematikou tepelných a fázových pnutí, fyzikálních a materiálových vlastností, konstrukce odlitku a průběhu technologického procesu výroby od způsobu lití, tuhnutí a chladnutí, až po tepelné zpracování a odstraňování velkých náliček. Důležitou podmínkou k opatření proti vzniku vnitřních trhlin nebo prasklin je znalost pružně-plastických vlastností materiálu a příčiny vzniku vnitřních pnutí v odlitku.

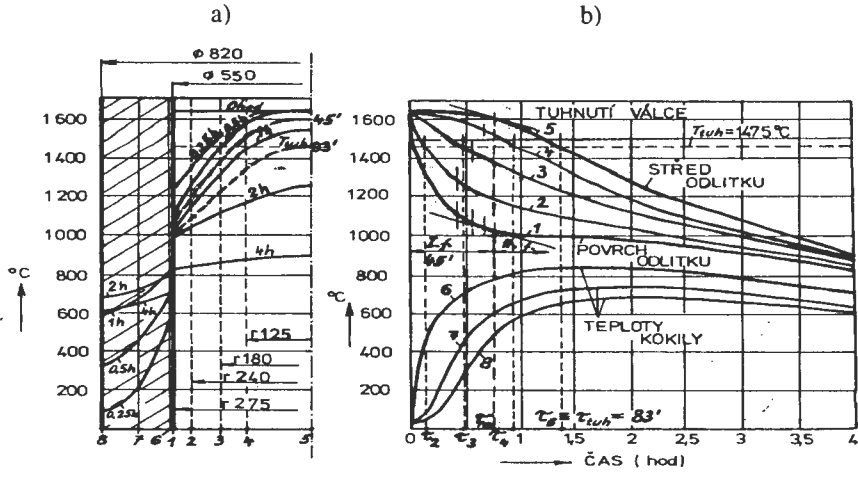
Z obecného hlediska je zvýšené nebezpečí vzniku těchto vnitřních vad u odlitků z oceli s vyšším obsahem uhlíku, legujících prvků, vysokou hodnotou modulu pružnosti a při rychlých změnách tepelného režimu v době chladnutí odlitku.

Práce vznikla na základě řešení grantového projektu GA ČR č. 106/99/1537

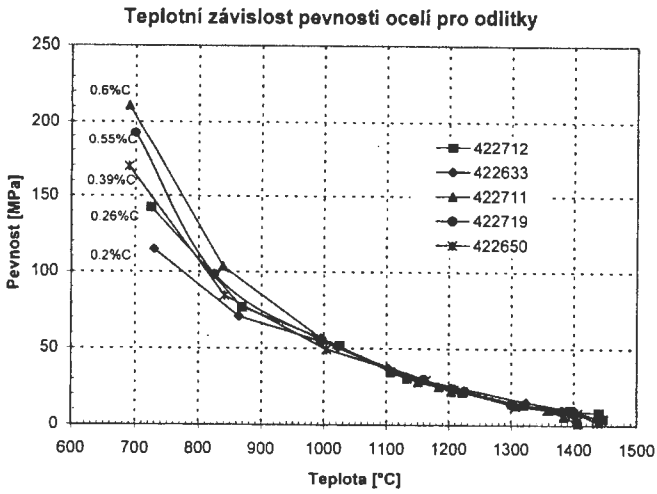
Literatura

1. Pluhař, J.: Nauka o kovech, SNTL, Praha 1987.
2. Elbel, T. a kol.: Vady odlitků ze slitin železa, MATCS, 1992, Brno.
3. Havlíček, F.: Teorie slévárenství, ES VŠB, Ostrava, 1992.
4. Stránský, K., Levíček, P.: Metalurgické vady ocelových odlitků, SNTL, Praha, 1983.
5. Braszczyński, J.: Teorie procesow odlewniczych, PWN, Warszawa, 1989.
6. Dekker, A. J.: Fyzika pevných látek, Academia, Praha, 1966.
7. Havlíček, F. a j.: Teplotní oblast a kritická teplota pružně-elastického stavu u litych materiálů; Mezinárodní konference VŠB-TU Ostrava, Frenštát p/R., 1997, Sb. S. 66.
8. Havlíček, F.: Vývojová zpráva, Vítkovice, n.p. Techn. Rozvoj, Ostrava 1982.
9. Čech, J.: Podmínky ovlivňující vnitřní pnutí odlitků a možnosti jeho měření, DT ČSVTS, Brno, 1973.
10. Longa, W.: Krzepnicie odlewow; Wydawnictwo „Ślask“, Katowice 1985.
11. Havlíček, F.: K otázce vzniku trhlin v odlitcích; Slévárenství, č. 8, s. 360–366.
12. Kozelský, P., Szromek, P., Havlíček, F.: Studium vlastností oceli v oblasti solidu;
13. Mezinárodní konference VŠB-TU Ostrava, Frenštát p/R., 1997, Sb, s. 85.
14. Havlíček, F. a kol.: Krystalizační pevnost slitin železa v oblasti teplot solidu; Závěrečná zpráva grantového úkolu, Katedra slévárenství, VŠB, 1994.
15. Havlíček, F., Kozelský, P., Szromek, P.: Termofyzikální a pružně-plastické vlastnosti kovů při tuhnutí a chladnutí; Závěrečná zpráva grantového úkolu, kat. slévárenství, VŠB-TUO, 1999.

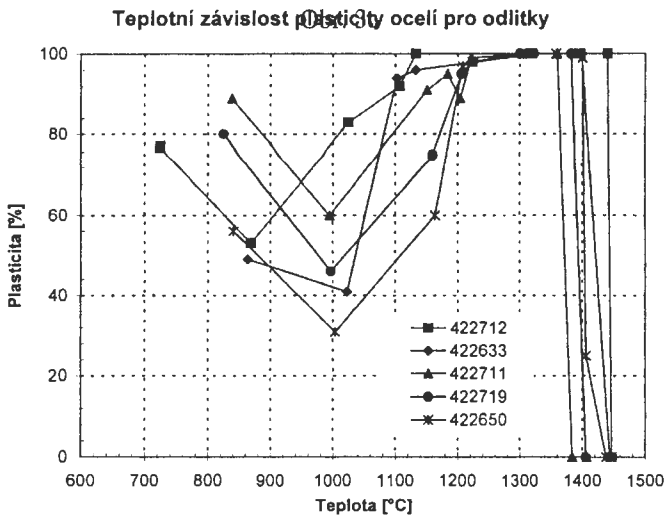
Recenzował: prof. dr hab. inż. Zdzisław Samsonowicz



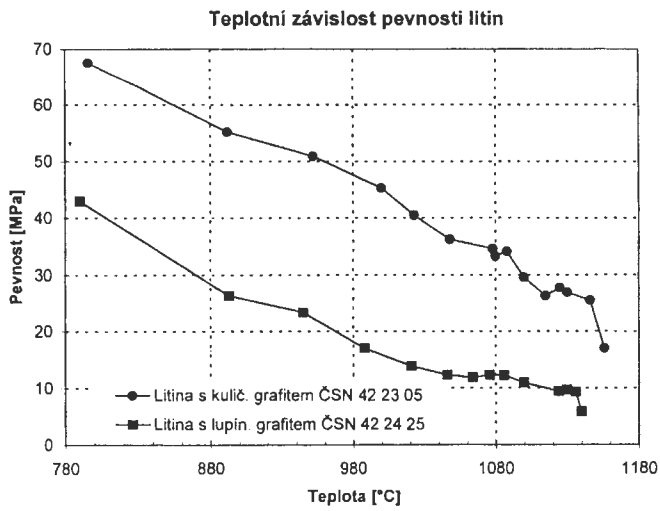
Obr. 1



Obr. 2a

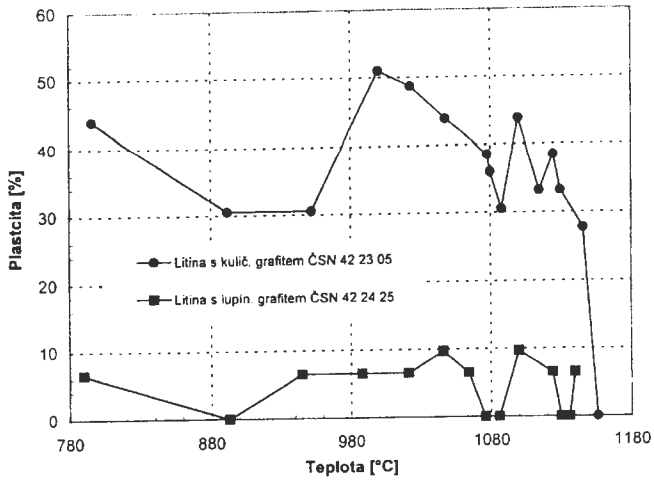


Obr. 2b

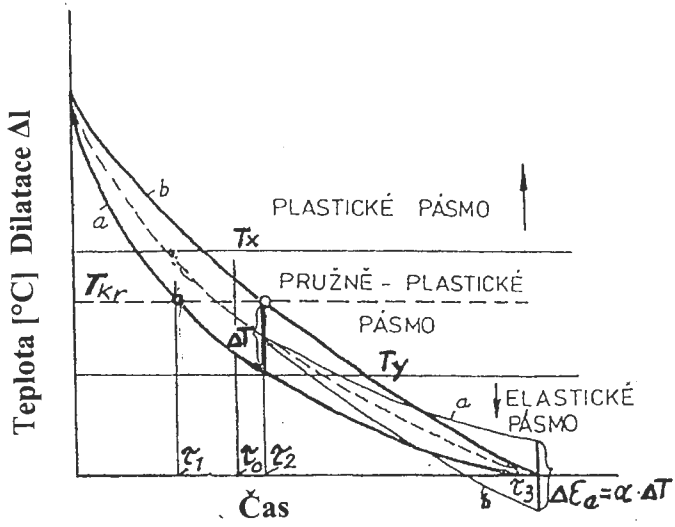


Obr. 3a

Teplotní závislost plasticity litiny vyjádřené zúžením

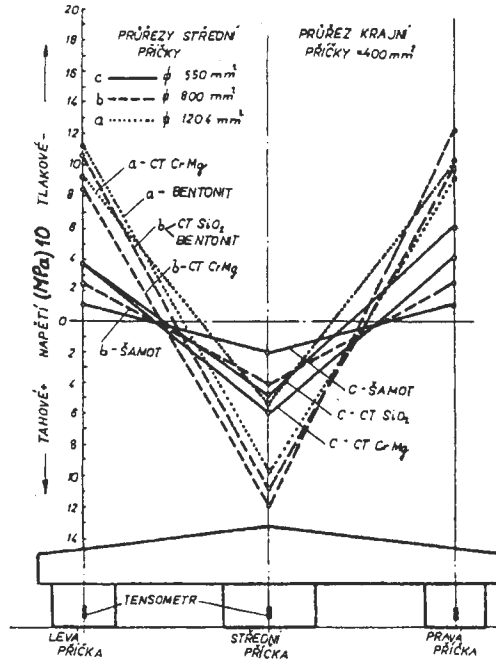


Obr. 3b



Obr. 4

PRŮBĚH ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ V OCEL. MŘÍŽI



Obr. 5