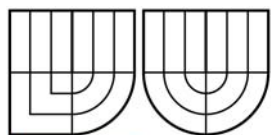




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY



NUMERICKÁ SIMULACE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ GRAFITICKÝCH LITIN

NUMERICAL SIMULATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CAST IRONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB HALUZA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR KRUTIŠ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Haluza

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Numerická simulace mechanických vlastností grafitických litin

v anglickém jazyce:

Numerical simulation of mechanical properties of cast irons

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat možnostmi využití numerické simulace v oblasti predikce mechanických vlastností grafitických litin. Práce bude zaměřena na modelování vermikulární litiny. Budou rozebrány možnosti numerických analýz se zaměřením na výpočty meze pevnosti a tvrdosti a výsledky budou validovány na reálných odlitcích firmy Heunisch Brno, s.r.o.

Cíle diplomové práce:

Teoretický rozbor možností numerické simulace v oblasti predikce mechanických vlastností.

Sestavení modelu numerické simulace se zaměřením na výpočet struktury a mechanických vlastností.

Analýza výsledků a experimentální validace na konkrétních odlitcích.

Seznam odborné literatury:

1. Ductile Iron Handbook. Des Plaines: AFS, 1993. 277 p. ISBN 978-0-87433-364-0.
2. ROUČKA, J. Metalurgie litin. Brno: PC-DIR REAL, 1998. 166 s. ISBN 80-214-1263-1.
3. HERMAN A., aj. Počítačové simulace ve slévárenství. Skripta ČVUT. Praha: České vysoké učení technické, 2000. 62 s. ISBN 80-01-02220-X.
4. Bonollo, F. and ODORIZZI, S. Numerical Simulation of Foundry Processes. Padova: S.G.E., 2001. 264 p. ISBN 88-86281-63-3.
5. Iron Casting Handbook. Columbus: Iron Casting Society, 1981. ISBN 978-0-75064-285-9.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 11.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se v první části zabývá výrobou, vlastnostmi a užitím vermikulární litiny. Poté je uveden výpočtový model softwaru ProCAST, který je užit pro predikci mechanických a strukturních vlastností u grafitických litin a jsou uvedeny rozdíly mezi verzí 2010 a 2011. V poslední části se práce zabývá simulací mechanických a strukturních vlastností pro přilité vzorky a reálný odlitek vyráběný ve slévárně Heunisch, s.r.o. a porovnáním výsledků s naměřenými hodnotami.

Klíčová slova

vermikulární litina, vlastnosti, simulace mechanických vlastností

ABSTRACT

Diploma thesis in the first part deals with the production, properties and application of compacted graphite iron. After then calculation model which is used in ProCAST software for the predicting mechanical and structural properties of compacted graphite iron is presented and differences between versions 2010 and 2011 are shown. The last part of the thesis deals with simulation of mechanical and structural properties on the test specimen and real casting, which is poured in Heunisch foundry Ltd. and results of the simulation and measured values are compared.

Key words

Compacted Graphite Iron, Properties, Simulation of Mechanical Properties

CITACE

HALUZA, J., *Numerická simulace mechanických vlastností grafitických litin*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 65 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Numerická simulace mechanických vlastností grafitických litin vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce

Datum 15. 5. 2012

.....

Bc. Jakub Haluza

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat Ing. Vladimíru Krutišovi Ph.D za cenné připomínky a rady k vypracování diplomové práce, Ing. Vlastimilu Koldovi a firmě MECAS ESI s.r.o. za předání zkušeností se simulačním softwarem ProCAST.

Dále děkuji firmě Heunisch s.r.o. za poskytnutí podkladů pro vypracování diplomové práce.

Na závěr chci také poděkovat rodičům za vše, co mi poskytují a dalším lidem, kteří mne podporují nejen ve studiu.

OBSAH

Abstrakt	- 4 -
Citace	- 4 -
Prohlášení	- 5 -
Poděkování	- 6 -
Obsah	- 7 -
1 Úvod	- 9 -
2 Charakteristika vermikulární litiny	- 10 -
2.1 Tvar grafitu	- 10 -
2.2 Struktura kovové matrice.....	- 11 -
2.3 Chemické složení	- 13 -
2.3.1 Základní prvky obsažené ve vermikulární litině	- 13 -
2.3.2 Základní chemické složení vermikulární litiny.....	- 14 -
2.4 Vlastnosti vermikulární litiny	- 14 -
2.4.1 Mechanické vlastnosti	- 14 -
2.4.2 Technologické vlastnosti	- 16 -
2.4.3 Fyzikální vlastnosti	- 16 -
3 Výroba vermikulární litiny	- 17 -
3.1 Modifikace Mg na vermikulární grafit.....	- 17 -
3.2 Modifikace Mg s přidavkem antiglobularizačního prvku	- 17 -
3.3 Užití předslitiny Mg, Ce a kovů vzácných zemin.....	- 18 -
4 Uplatnění vermikulární litiny	- 19 -
4.1 Porovnání vermikulární litiny s jinými materiály	- 19 -
4.1.1 Vermikulární a šedá litina	- 19 -
4.1.2 Vermikulární a tvárná litina	- 21 -
4.1.3 Vermikulární litina a slitiny hliníku.....	- 22 -
4.2 Využití	- 23 -
4.3 Atlas odlitků [14].....	- 24 -
4.3.1 Hlavy a bloky motorů, motorové a klikové skříně	- 24 -
4.3.2 Konzoly a příruby	- 24 -
4.3.3 Rotační díly, písty, brzdové kotouče, ozubená kola	- 24 -
4.3.4 Skříně a součásti čerpadel a ventilátorů.....	- 25 -
5 Numerická simulace mikrostruktury a mechanických vlastností litin -	26 -
5.1 Základní úkoly simulace [18]	- 26 -
5.2 Simulace mikrostruktury litin [18].....	- 26 -
5.3 Simulace mechanických a fyzikálních vlastností litin [18].....	- 27 -
5.4 Matematický model užitý v softwaru ProCAST [19].....	- 27 -
5.4.1 Změny ve verzi 2011 oproti verzi 2010.....	- 27 -
5.4.2 Modelování vermikulární litiny	- 28 -
5.4.3 Výpočtový model	- 28 -
6 Simulace přilitých vzorků a porovnání	- 31 -
6.1 Popis vzorků.....	- 31 -
6.2 Modelování a simulace.....	- 31 -
6.2.1 Geometrický model přilitých vzorků	- 31 -
6.2.2 Počáteční a okrajové podmínky	- 32 -
6.2.3 Parametry simulace pro výpočet mechanických vlastností	- 33 -
6.3 Zpracování naměřených dat.....	- 34 -
6.4 Výsledky simulace.....	- 35 -
6.4.1 Mez pevnosti	- 35 -
6.4.2 Strukturní vlastnosti.....	- 40 -

6.5	Vyhodnocení výsledků	- 44 -
6.5.1	Mez pevnosti	- 44 -
6.5.2	Strukturní vlastnosti	- 45 -
7	Simulace reálného odlitku a porovnání.....	- 46 -
7.1	Místa odběru vzorků	- 46 -
7.2	Modelování a simulace	- 47 -
7.2.1	Geometrický model odlitku	- 47 -
7.2.2	Počáteční a okrajové podmínky	- 48 -
7.2.3	Parametry simulace pro výpočet mechanických vlastností	- 50 -
7.3	Zpracování naměřených dat	- 50 -
7.4	Výsledky simulace	- 50 -
7.4.1	Mez pevnosti	- 50 -
7.4.2	Nodularita	- 54 -
7.5	Vyhodnocení výsledků	- 57 -
7.5.1	Mez pevnosti	- 57 -
7.5.2	Nodularita	- 57 -
8	Závěr.....	- 58 -
	Seznam použitých zdrojů	- 59 -
	Seznam použitých zkratk a symbolů	- 61 -
	Seznam obrázků	- 62 -
	Seznam tabulek	- 64 -
	Seznam vzorců	- 65 -

1 ÚVOD

Objev vermikulární litiny (litiny s červíkovitým grafitem) souvisí s prvními pokusy o výrobu litiny s kuličkovým grafitem na konci 40. let minulého století. Litina s touto specifickou strukturou grafitu vznikala v důsledku nedokonalé modifikace a proto byla považována za nežádoucí. První studie o pozitivních vlastnostech této litiny se objevují již v 50. letech avšak k průmyslovému užití dochází až s nástupem kvalitních měřících a řídicích systémů, které jsou schopny zaručit dostatečnou kvalitu při výrobě.

Vermikulární litina se v současné době dostává do popředí zájmů nejen konstruktérů (kteří požadují odlitky s vlastnostmi, které přesně vyhoví dané konstrukci), ale i řídicích pracovníků sléváren, kteří se snaží udržet své provozy v konkurenceschopném stavu tím, že nabízí zákazníkům odlitky o lepších vlastnostech a jakosti díky materiálům, které jiné slévárny nedokáží vyrobit.

V současné době se stává simulace slévárenských procesů velkým pomocníkem ve vývoji a výrobě odlitků. Dnes je technolog schopen nejen odladit pomocí simulace výrobní postup tak, že odlévá „na poprvé správně“, ale také dokáže predikovat výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti odlitku. Technolog si tak dokáže udělat poměrně přesný obrázek o procesech, které během lití, tuhnutí a chladnutí ve formě probíhají a konstruktér získává přehled o tom, jak se bude materiál pro daný odlitek chovat a jaké budou výsledné mechanické vlastnosti přímo na odlitku.

Význam možnosti simulovat mechanické vlastnosti (jako je např. mez pevnosti a tvrdost) roste zvláště u materiálů, kde se vlastnosti výrazně mění v závislosti na charakteru a rychlosti chladnutí (v praxi jsou tyto parametry reprezentovány převážně tloušťkou stěny). Mezi takové materiály bezesporu patří grafitické litiny a vzhledem k objemu výroby litiny a konkurenci, která v těchto podmínkách panuje, je vítána každá možnost zvýšit konkurenceschopnost slévárny. Jednou z těchto možností může být právě simulace mechanických vlastností.

Práce se bude zabývat možnostmi využití numerické simulace v oblasti predikce mechanických vlastností grafitických litin. Práce bude zaměřena na modelování vermikulární litiny a budou rozebrány možnosti numerických analýz se zaměřením na výpočty meze pevnosti a strukturních charakteristik a výsledky budou validovány na reálných odlitcích firmy Heunisch Brno, s.r.o.

Cílem práce je tedy teoretický rozbor vlastností vermikulární litiny a možnosti numerické simulace v oblasti predikce mechanických vlastností, sestavení modelu numerické simulace se zaměřením na výpočet struktury a mechanických vlastností a analýza výsledků a experimentální validace na konkrétních odlitcích.

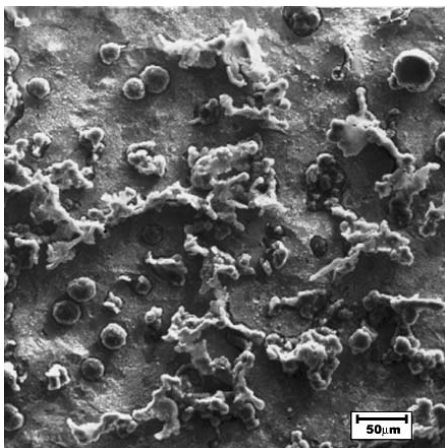
2 CHARAKTERISTIKA VERMIKULÁRNÍ LITINY

Litina je slitina železa, uhlíku a doprovodných prvků (žádoucích i nežádoucích). Minimální množství uhlíku je 2,08% a ve slitině je vázán převážně jako grafit. Dalšími možnými strukturami uhlíku v litině je karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku [1,2].

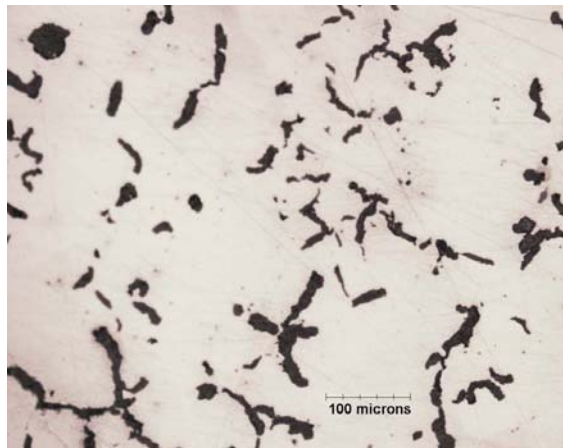
V odborné literatuře bývá tento materiál označován různě. U nás se pro označení litiny s vermikulárním (nebo také červíkovitým) grafitem užívá označení GJV. Někdy se také užívá zkratky LVG. V anglické literatuře mluvíme o CGI – Compacted Graphite Iron [1,3].

2.1 Tvar grafitu

Vermikulární litina obsahuje grafit ve formě často přirovnávané ke korálům. Jeden takový útvar grafitu tvoří eutektickou buňku. Právě specifický tvar grafitu, který má dobrou adhezi k vlastní kovové matici, zaručuje zvýšení mechanických vlastností u těchto litin. Na snímku metalografického výbrusu se tyto útvary jeví jako červíky se zakulacenými hranami, popřípadě kuličky. U LVG je často část grafitu vyloučena ve formě kuliček. Množství globulárního grafitu se označuje jako nodularita. Uvádí se v procentech a hodnoty se pohybují v rozmezí 10 – 20% [3,4].



Obr. 2.1 Vermikulární grafit – elektronová mikroskopie [5]



Obr. 2.2 Vermikulární grafit – metalografický výbrus [6]

Vliv rychlosti ochlazování na tvar grafitu: Při rychlejším ochlazovacím účinku (tj. při menší tloušťce stěny) dochází snadněji ke globularizaci grafitu. Při menších ochlazovacích účincích v tlustých stěnách může vzniknout dokonce grafit ve formě lupínků [1,7].

Vliv chemického složení na tvorbu grafitu: Podle účinků na grafitizaci litiny při tuhnutí eutektika se prvky rozdělují do těchto skupin [1]:

- grafitizační (Si, Al, Ni, Cu)
- antigrafitizační (Cr, V, Mg, S, Ce, B)
- neutrální (Mn, Co, Zn, W)

Grafitizační prvky podporují tuhnutí podle stabilního systému Fe – C a vyloučení uhlíku v podobě grafitu. Antigrafitizační prvky váží uhlík ve formě karbidů, nebo brání krystalizaci grafitu. Podporují metastabilní tuhnutí podle

systemu Fe – Fe₃C a vznik ledeburitu. Takto vzniklý ledeburit je ve struktuře grafitických litin nežádoucí a bývá označován jako zákalka.

2.2 *Struktura kovové matrice*

Matrice bývá také někdy nazývána základní kovová hmota a spolu s tvarem grafitu má největší vliv na výsledné vlastnosti litiny [2].

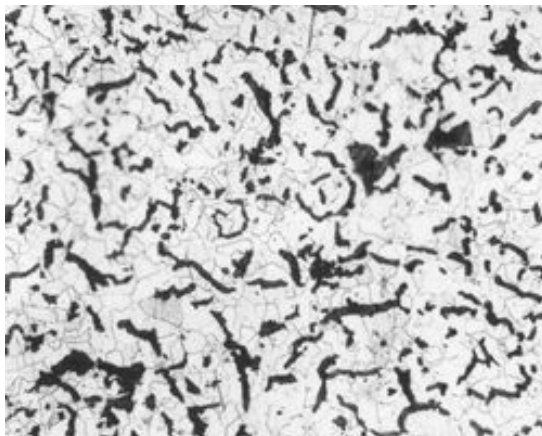
Výsledná struktura kovové matrice závisí především na:

- chemickém složení
- charakteru (rychlosti) ochlazování
- stavu krystalizačních zárodků
- tepelném zpracování

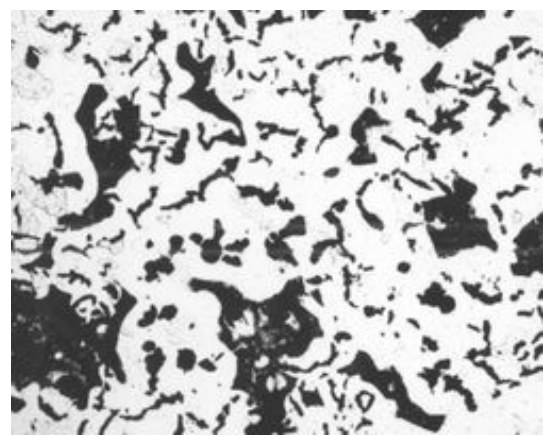
U litiny s červíkovitým grafitem rozlišujeme tyto tři druhy struktury základní kovové hmoty [2]:

- feritická
- perlitická
- feriticko – perlitická

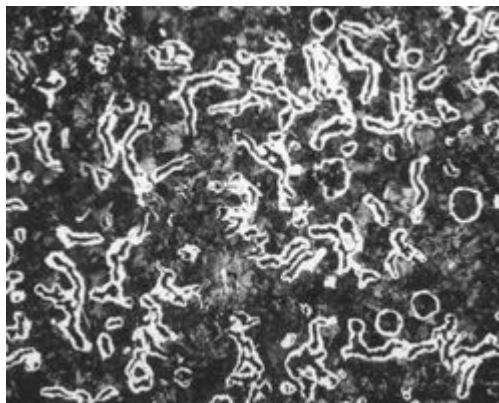
Ferit: Ferit krystalizuje v FCC mřížce, plošně středěně. Rozpustnost uhlíku ve feritu za pokojové teploty je nižší než 0,01%. Ferit je produktem eutektoidní transformace autstenitu ve stabilním systému Fe – C a právě proto



Obr. 2.3 Feritická struktura u vermikulární litiny [2]



Obr. 2.4 Feriticko – perlitická struktura u vermikulární litiny [2]



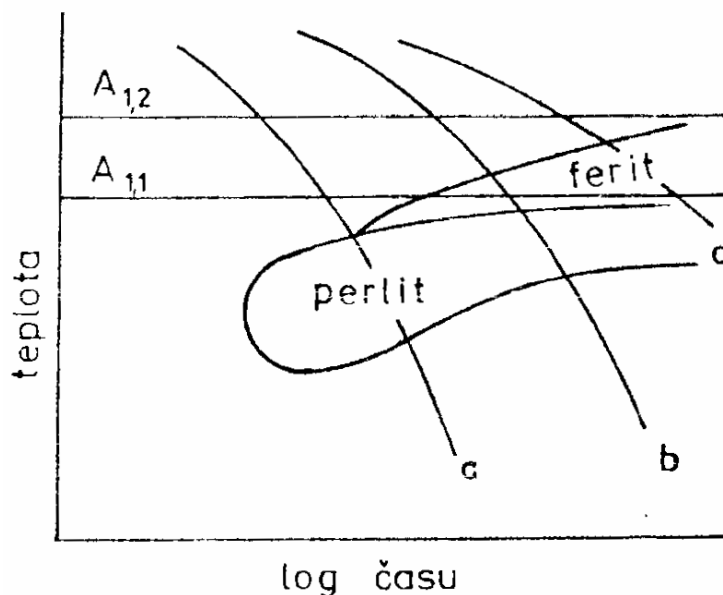
Obr. 2.5 Perlitická struktura u vermikulární litiny [2]

pomalé ochlazování (např. tuhnutí tlustých stěn odlitku) podporuje vznik feritu. Ferit je měkký a tvárný ($R_m=220\text{Mpa}$, $A_5=70\%$, tvrdost se pohybuje okolo 50HB). Vznik feritu je podporován přítomností feritotvorných prvků v litině. Mezi feritotvorné prvky patří hlavně Si, z legur je to Al a Ti [1].

Perlit: Perlit je eutektoid, který je produktem rozpadu austenitu podle metastabilního systému Fe – Fe₃C a je tvořen lamelami feritu a cementitu. Vzniká při vyšších ochlazovacích rychlostech (v tenkých stěnách odlitku). Z jednoho zrna austenitu vzniká více zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel. Ve srovnání s feritem má perlit vyšší pevnost a tvrdost, ale snížené plastické vlastnosti ($R_m=800\text{Mpa}$, tvrdost je 280HB). Tvorbu perlitu v litině podporuje Mn, z legur je to Cu a Ni [1].

Na vlastnosti perlitu má významný vliv disperzita perlitu. Ta je určena mezilamelární vzdáleností dvou sousedních lamel feritu. Čím jsou lamely jemnější, tím vyšších mechanických vlastností je u perlitu dosahováno [1].

Vliv rychlosti ochlazování na matici: Jak již bylo zmíněno výše, rychlost ochlazování ovlivňuje výslednou strukturu matrice. Při pomalejším ochlazování (tj. plošší teplotní gradienty, tlusté stěny) dochází ke stabilnímu tuhnutí a vzniká ferit. S rostoucí rychlostí ochlazování (např. v tenkých stěnách) dochází k metastabilnímu tuhnutí a tím vzniká struktura feriticko – perlitická, popř. perlitická [1].



Obr. 2.6 Vliv rychlosti ochlazování na výslednou strukturu matrice [1]

Vliv chemického složení na strukturu matrice: Na základě různého chemického složení litiny může vznikat různá struktura matrice. Účinek prvků na způsob transformace austenitu spočívá hlavně v ovlivnění aktivity uhlíku v austenitu a difúzních poměrů na mezifázovém rozhraní při transformaci austenitu. Prvky podle toho rozdělujeme na [1]:

- feritotvorné (Si, Al, Ti)
- perlitotvorné (Mn, Cu, Sn, Sb, Cr, V, W)

2.3 Chemické složení

Hodnocení chemického složení: Nejběžnějším způsobem hodnocení chemického složení je uhlíkový ekvivalent C_E . Vyjadřuje vliv jednotlivých prvků obsažených v litině v daném množství na polohu eutektického bodu. Uhlíkový ekvivalent se vypočte podle tohoto vztahu [1]:

$$C_E = C + \frac{1}{3}(Si + P) \quad (2.1)$$

Kde:

C_E – uhlíkový ekvivalent

C – obsah uhlíku [%]

Si – obsah křemíku [%]

P – obsah fosforu [%]

Podle hodnoty uhlíkového ekvivalentu se dá zjistit, o jaký druh litiny se jedná. Hraniční hodnotou C_E je 4,25. Je to hodnota odpovídající přesně eutektickému složení [1]:

$C_E < 4,25$ – podeutektická litina

$C_E = 4,25$ – eutektická litina

$C_E > 4,25$ – nadeutektická litina

Jelikož je litina s vermikulárním grafitem vyráběna o přibližně eutektickém složení, tak uhlíkový ekvivalent se pohybuje okolo 4,2 – 4,5 [1].

2.3.1 Základní prvky obsažené ve vermikulární litině

Uhlík (C): Spolu s křemíkem má největší vliv na strukturu. Větší množství vyloučeného uhlíku podporuje útlumové vlastnosti litiny. Uhlík v grafitických litinách se vyznačuje tzv. grafitickou expanzí (při chladnutí uhlík zvětšuje svůj objem) a ta je tím větší, čím vyšší je obsah uhlíku v litině. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku dochází ke zmenšení stahování litin, takže nemusí být litina tolik nálitkována [1].

Křemík (Si): V litinách výrazně podporuje grafitizaci a vznik feritu. Se stoupajícím obsahem křemíku dochází ke zvyšování tranzitní teploty a tím k podpoře vzniku křehkého lomu za snížených teplot [1].

Mangan (Mn): Mangan patří mezi perlitotvorné prvky a v menším množství (do 0,5%) nijak neovlivňuje grafitizaci. Mangan zvyšuje disperzitu perlitu (zjemňuje lamelární strukturu), u litin zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost proti otěru. V litinách s lupínkovým grafitem má mangan důležitou funkci a tou je vázání síry. Úlohu odsiřování u vermikulární litiny přebírá hořčík, podobně jako je tomu u litin s kuličkovým grafitem [1].

Síra (S): Síra je jako u litin s kuličkovým grafitem považována za nežádoucí prvek. Při vyšších obsazích síra výrazně ovlivňuje tuhnutí a grafitizaci [1].

Fosfor (P): Fosfor je také považován za nežádoucí prvek. Při vyšších obsazích tvoří na hranicích zrn fosfidické eutektikum ve formě síťoví a to výrazně snižuje mechanické vlastnosti výsledné litiny [1].

2.3.2 Základní chemické složení vermikulární litiny

Chemické složení vermikulární litiny je velmi podobné složení litiny s kuličkovým grafitem. Chemické složení je závislé na množství podmínek, jako je doba tuhnutí, tloušťka stěny, doba lití apod. Proto je také v literatuře uváděno různé složení vermikulární litiny.

Tab. 2.1 Složení vermikulární litiny (hodnoty v %) [1]

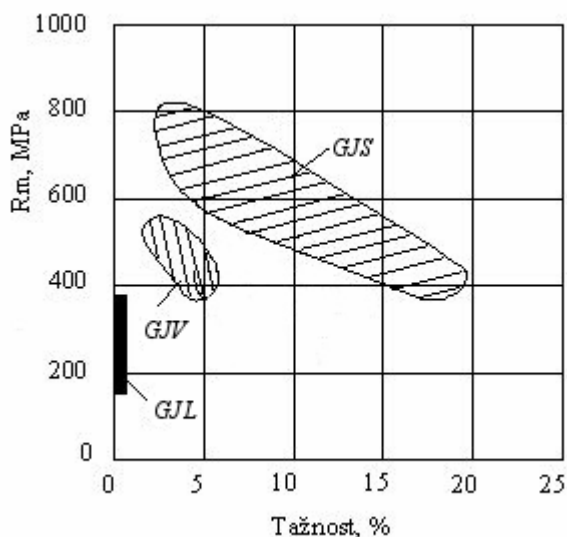
C	Si	Mn	P	S
3,4-3,8	2,4-2,7	max 0,6	max 0,06	max 0,02

Tab. 2.2 Složení vermikulární litiny (hodnoty v %) [5]

C	Si	Mn	P	S
3,65	2,35	0,12	0,026	0,008

2.4 Vlastnosti vermikulární litiny

Z hlediska vlastností stojí litina s vermikulárním grafitem na pomezí mezi LLG a LKG a kombinuje přednosti obou těchto druhů litin. Litina vermikulární vykazuje mnohem vyšší pevnostní charakteristiky než je tomu u litiny s lupínkovým grafitem, ale současně zachovává její technologické a útlumové vlastnosti. Toto předurčuje tuto litinu ke zcela specifickému užití, protože při zachování únosnosti daného výrobku vyrobeného z vermikulární litiny postačuje menší tloušťka stěny odlitku, než je tomu u litiny s lupínkovým grafitem. Tato skutečnost umožňuje materiálovou, rozměrovou a hmotnostní úsporu na finálním odlitku [1,2,3].



Obr. 2.7 Mechanické vlastnosti grafitických litin [2]

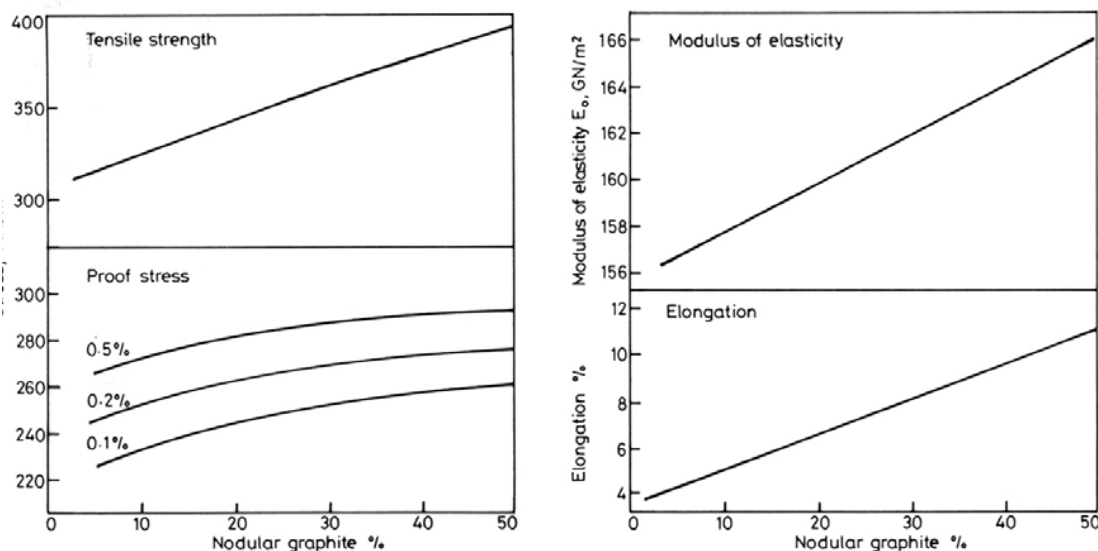
2.4.1 Mechanické vlastnosti

Mez pevnosti, tvrdost, tažnost: Hodnoty těchto vlastností u vermikulární litiny se pohybují mezi hodnotami vlastností litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Mechanické vlastnosti jsou závislé na [2]:

- tvaru grafitu

- struktuře matrice

S rostoucí nodularitou grafitu dochází k nárůstu tažnosti litiny při zachování pevnosti. Naopak pokud se ve struktuře litiny objeví grafit ve formě lupínků, dochází k výraznému poklesu pevnosti. S rostoucím podílem perlitu v základní kovové hmotě narůstá pevnost vermikulární litiny [1].



Obr. 2.8 Vliv nodularity na mechanické vlastnosti LVG [8]

Tab. 2.3 Mechanické vlastnosti LVG [9]

Struktura	Mez pevnosti [MPa]	Tvrdość [HB]	Tažnost [%]
Feritická	300	130-190	2
Feriticko - perlitická	400	190-280	1-1,5
Perlitická	500	240-280	0,5

Mez únavy: Únava materiálu je v dnešní době velmi diskutované téma v souvislosti s životností strojních součástí. Únavové vlastnosti materiálu určují, jak dlouho dokáže strojní součást, která je cyklicky namáhaná pracovat bez porušení. Litina s vermikulárním grafitem se velmi často užívá jako materiál pro odlitky bloků motorů osobních i nákladních automobilů. V porovnání s litinou s lupínkovým grafitem vykazuje LVG lepší únavové vlastnosti. Mez únavy LVG se pohybuje v rozmezí od 100 do 175Mpa. Vliv na mez únavy má především [10]:

- tvar, velikost a rozložení grafitu
- struktura základní kovové hmoty (feritická, perlitická)

V souvislosti s tvarem grafitu má výrazný vliv na únavové vlastnosti nodularita vermikulární litiny. S rostoucím podílem globulárního grafitu v LVG dochází k nárůstu pevnostních charakteristik včetně meze únavy. Naopak pokud se ve struktuře objeví byť malé množství grafitu ve formě lupínků, dochází k rychlému poklesu únavových vlastností [10].

V předchozích kapitolách bylo uvedeno, že perlit je v litinách nositelem pevnosti. S rostoucím podílem perlitu ve struktuře dochází k nárůstu mechanických vlastností včetně meze únavy. Z tohoto důvodu se také používá pro odlitky bloků motorů vermikulární litina s co největším podílem perlitu [10].

2.4.2 Technologické vlastnosti

Technologickými vlastnostmi se rozumí především zabíhavost a stahování litiny. Tyto vlastnosti jsou velmi podobné jako u litiny s lupínkovým grafitem. Tzn., že vermikulární litina má velmi dobré slévárenské vlastnosti, nemusí se tak složitě nálitkovat a pro výrobu forem je možné užít modelového zařízení, které se užívá pro odlitky z šedé litiny. Pokud se tedy pro určitý odlitek přechází z litiny šedé na vermikulární, odpadá návrh nového modelového zařízení [11].

2.4.3 Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost: Dobrá tepelná vodivost materiálu může být hlavním důvodem volby materiálu pro některé aplikace, jako jsou brzdové disky nebo bloky motorů. Pro tyto druhy odlitků je proto velmi často volena litina s lupínkovým grafitem a určitou alternativou může být litina s vermikulárním grafitem [12].

Tepelná vodivost vermikulární litiny je zhruba o polovinu menší, než je tomu u litiny s lupínkovým grafitem. Avšak na rozdíl od LLG, kde dochází k poklesu tepelné vodivosti při zahřívání materiálu, LVG vykazuje konstantní průběh teplotní vodivosti, případně jen mírný pokles. Tepelná vodivost je také výrazně závislá na nodularitě grafitu. S rostoucím podílem kuličkového grafitu v litině dochází k poklesu hodnot tepelné vodivosti [12].

Útlum: Na útlum kmitů v litinách má vliv převážně tvar grafitu. Vysoké útlumové schopnosti litiny jsou způsobeny porušením základní kovové hmoty útvary grafitu. Útlum je sledován pomocí logaritmického dekrementu útlumu [8].

Vermikulární litina má také **vysokou otěruvzdornost a lepší odolnost proti oxidaci za vysokých teplot** (950°C), než mají litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem. LVG má nižší lineární a objemovou smršťivost a menší sklon k tvorbě vnitřního pnutí, než ostatní grafitické litiny [8,11].

3 VÝROBA VERMIKULÁRNÍ LITINY

Z pohledu složení, přípravy vsázkových surovin a tavení je výroba LVG velmi podobná výrobě litiny s kuličkovým grafitem. Podstatným rozdílem ve výrobě je však způsob modifikace, který zaručí tvorbu grafitu ve formě červíků a nikoliv kuliček. Jsou známe tyto druhy modifikování [2]:

- modifikace Mg na vermikulární grafit
- modifikace Mg s přídatkem antiglobularizačního prvku (Ti)
- užití předslitiny Mg Ce a kovů vzácných zemin

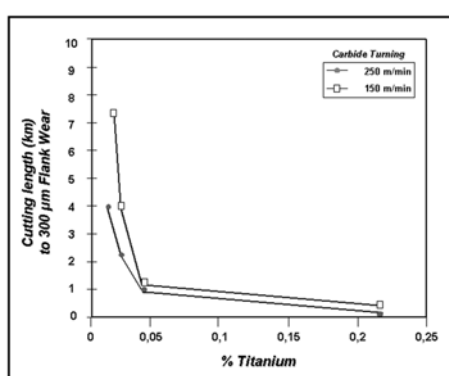
Po modifikaci vždy následuje očkování litiny. Užívá se standardních očkovadel FeSi75 [2].

3.1 Modifikace Mg na vermikulární grafit

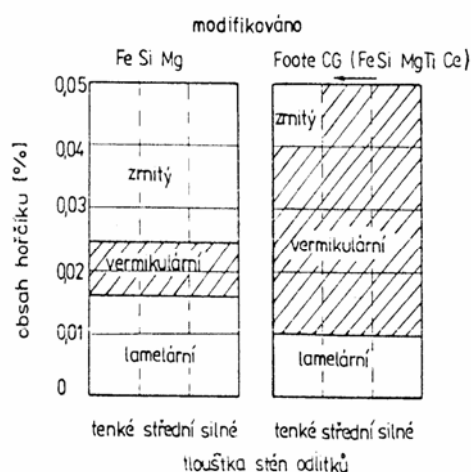
Litina s vermikulárním grafitem vzniká při modifikaci hořčíkem v rozmezí 0,015 až 0,025%. Toto rozmezí je velmi úzké a je obtížné těchto hodnot dosahovat také v souvislosti s obsahem síry v litině, jelikož Mg také slouží k odsíření (váže síru a tvoří MgS) [1].

Takovéto zpracování litiny se nazývá redukovaná Mg – metoda a tento postup je v praxi nejobtížnější. Pro přesné dávkování se může užit metody měření aktivity kyslíku v litině. Na základě tohoto měření se určí dávkování předslitiny. V rámci SinterCast, NOVACAST a OxyCast byl navržen postup s užitím předslitiny Mg – Ce. Nejprve se litina podmodifikuje a pomocí termické analýzy na vzorku se sleduje průběh tuhnutí. Na základě výsledků se poté upraví modifikace a očkování tavby. Tento postup je vhodný pro slévárny automobilového průmyslu, kde se dají zajistit stabilní provozní podmínky [8,11].

3.2 Modifikace Mg s přídatkem antiglobularizačního prvku



Obr. 3.1 Vliv množství Ti na obrobiteľnosť [13]



Obr. 3.2 Vliv užitého modifikátoru na modifikační rozsah Mg [1]

V tomto případě se modifikuje podobně jako tomu je u litiny s kuličkovým grafitem. Rozdílem je však přídatkem antiglobularizačního prvku. Nejčastěji se používá titan v rozmezí 0,15 až 1,30%. Při užití modifikační slitiny Mg – Ce

dostačuje obsah Ti 0,1%. Titan se přidává buď před samotnou modifikací nebo je obsažen v modifikační předslitině. Titan zabrání globularizaci grafitu a tím nastartuje růst grafitu červíkovitého [1,11].

Tato metoda bývá užívána poměrně často, avšak má i několik úskalí. Titan je sám o sobě karbidotvorný prvek, podporuje vznik zákalky a často tvoří karbidy titanu (TiC). Další sloučeninou, která může vznikat při vysokých obsahách Titanu je nitrid TiN. Obě tyto sloučeniny tvoří vměstky, které zvyšují pevnost a tvrdost a způsobují tím zhoršení obrobiteľnosti výsledné vermikulární litiny [11,13].

Dalším problémem je, kontaminace vratu titanem. Titan není možné metalurgickými pochody z litiny vyloučit a má stálý antiglobularizační účinek. Proto je nutné ve slévárně sledovat množství Ti ve vratu a počítat s ním při výpočtu vsázky. Takový vrat je navíc nutné užít pouze znovu pro výrobu vermikulární litiny a v žádném případě se nesmí přimíchat do vsázky pro tvárnou litinu [1,11].

3.3 Užití předslitiny Mg, Ce a kovů vzácných zemin

Na trhu existuje velké množství modifikačních přípravků s obsahem kovů vzácných zemin a ceru. Literatura uvádí poměrně vysoké obsahy Ce (30 až 50%) v modifikačním přípravku. Užitím Ce pro modifikaci se odstraňují nevýhody užití modifikátorů pouze na bázi Mg, jako je nízká teplota vypařování Mg, bouřlivá reakce a rychlé odeznívání modifikačního účinku. V kombinaci s Ti se rozšiřuje interval obsahu Mg v litině, kdy vzniká vermikulární grafit, což snižuje požadavky na přesnější dávkování modifikátoru. Spotřeba předslitiny je dána především obsahem síry a kyslíku v litině. Nevýhodou tohoto způsobu je, že při předávkování KVZ se zvyšuje sklon ke vzniku zákalky v litině [1,11].

4 UPLATNĚNÍ VERMIKULÁRNÍ LITINY

4.1 Porovnání vermikulární litiny s jinými materiály

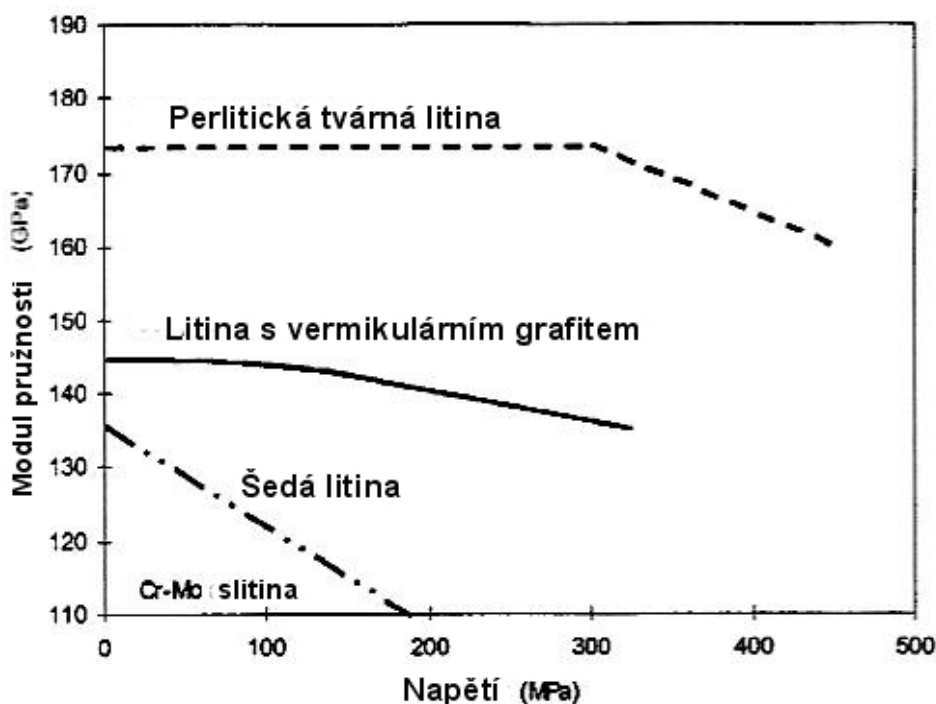
Tato kapitola shrnuje poznatky o vlastnostech vermikulární litiny a porovnává je s ostatními materiály, které se používají v podobných aplikacích.

4.1.1 Vermikulární a šedá litina

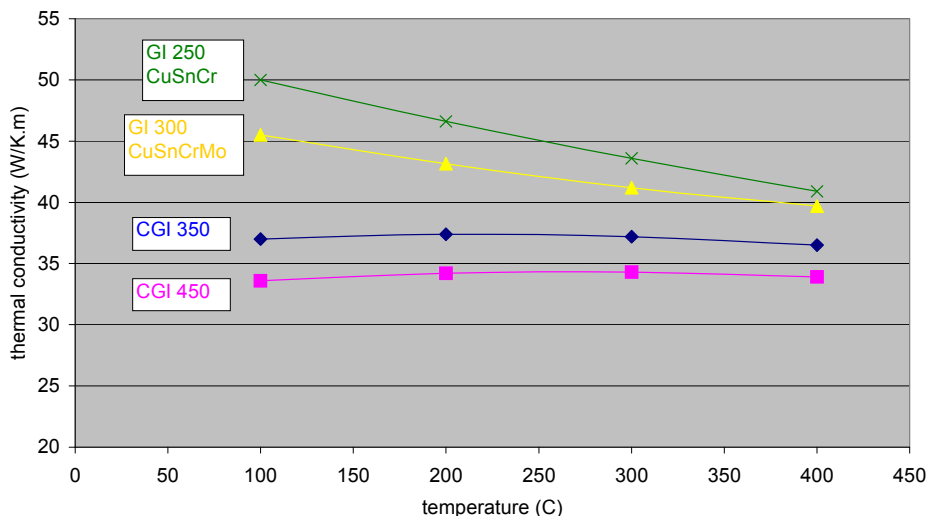
Mechanické vlastnosti: Díky charakteristickému tvaru grafitu u vermikulární litiny se dosahuje vyšší pevnosti a tvrdosti, než jakou vykazují litina šedá. Vermikulární litina má také mnohem lepší únavové vlastnosti, což jí dává lepší odolnost proti namáhání vysokocyklovou únavou, která je často vyžadována u komplikovaných odlitků pro náročné aplikace, jakými mohou být bloky motorů a skříňe strojů [9].

Tab. 4.1 Vlastnosti grafitických litin v závislosti na tvaru grafitu [9]

Vlastnost	Značka	Jednotka	Tvar grafitu		
			Lupínkový	Vermikulární	Kuličkový
Mez pevnosti	R_m	[MPa]	150 - 350	300 - 500	350 - 900
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	[MPa]	–	250 - 350	250 - 600
Pevnost v tlaku	R_D	[MPa]	500 - 1000	600	250 - 600
Mez únavy	σ_C	[MPa]	55 - 115	60 - 245	140 - 270
Lomová houževnatost	K_{Ic}	[MPa·m ^{1/2}]	320 - 650	–	14 - 31
Tvrdość	–	[HB]	150 - 280	150 - 250	140 - 350
Modul pružnosti	E	[GPa]	75 - 155	130 - 160	140 - 185
Tažnost	A	[%]	0,3 - 0,8	0,3 - 2	2 - 25

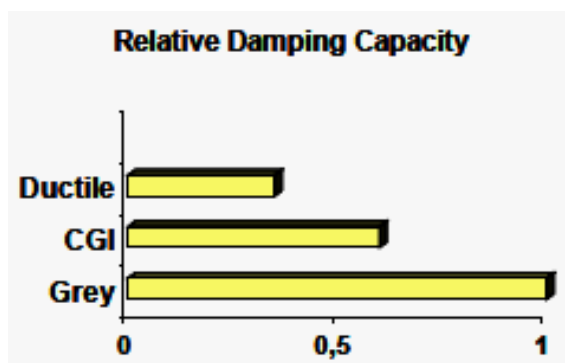


Obr. 4.1 Vliv zatížení litiny na modul pružnosti [14]



Obr. 4.2 Tepelná vodivost grafitických litin v závislosti na teplotě [12]

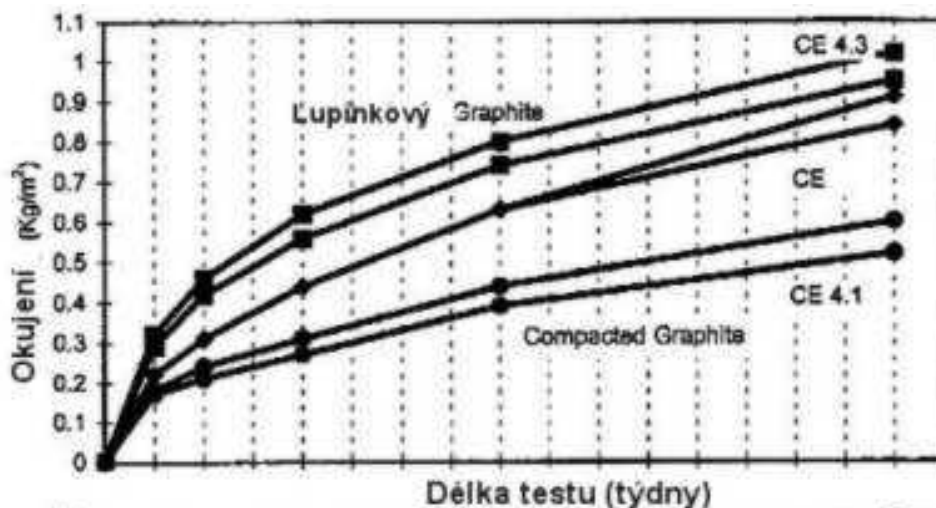
Fyzikální vlastnosti: Velkou předností šedých litin jsou právě vynikající fyzikální vlastnosti, jako je útlum a teplotní vodivost. U vermikulární litiny jsou tyto hodnoty nižší, avšak pokles není tak markantní, aby nemohla vermikulární litina nahradit šedou litinu. Navíc tepelná vodivost u vermikulární litiny s rostoucí teplotou neklesá a proto v aplikacích, kde jsou odlitky vystaveny vysokým teplotám (jako jsou např. bloky hlav válců a spalovacích motorů), mají odlitky z vermikulární litiny srovnatelnou tepelnou vodivost s odlitky z šedé litiny. Konkrétní hodnoty jsou vidět na obrázcích (obr. 4.2 a 4.3) [8,12].



Obr. 4.3 Relativní útlum u grafitických litin [8]

Opal (okujení) a růst: Toto jsou děje, které jsou spojovány s oxidací povrchu za vysokých teplot. Do teploty okolo 500°C jsou hodnoty opalu a růstu u šedé a vermikulární litiny podobné, avšak při hodnotách nad tuto teplotu dochází u vermikulární litiny k významnému snížení opalu a růstu. Této vlastnosti se dá využít při konstrukci odlitků, které budou pracovat za zvýšených teplot a budou vystaveny silně oxidační atmosféře – skříně turbín, či spalovacích strojů [14].

Redukce opalu se přisuzuje tomu, že LVG obsahuje menším grafitové částice a eutektické buňky, které omezují oxidaci ve větších vzdálenostech od povrchu [14].

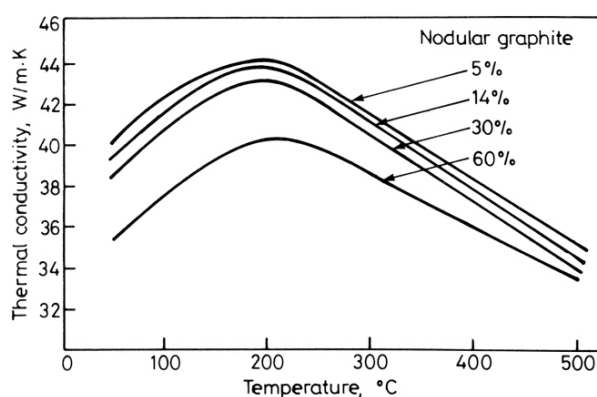


Obr. 4.4 Opal litiny při teplotě 600 °C v průběhu 34 týdnů [14]

Technologické vlastnosti: Vermikulární litina si zachovává díky výrazné grafitické expanzi technologické vlastnosti, které jsou pozitivně využívány u litiny šedé. Vermikulární litina nemá velký sklon k tvorbě staženin a ředin a má dobrou zabíhavost, stejně jako šedá litina. To je velká výhoda při přechodu z výroby šedé na vermikulární litinu, neboť se nemusí upravovat modelové zařízení [7,11].

V této oblasti leží hlavní těžiště užití vermikulární litiny jako alternativního materiálu. Z důvodu vyšších mechanických vlastností vermikulární litiny lze při konstrukci odlitku použít menší tloušťku stěny při stejné únosnosti, jako tomu je u šedé litiny. Takový odlitek bude mít navíc stále dobrou tepelnou vodivost a útlum při stejných technologických vlastnostech.

4.1.2 Vermikulární a tvárná litina



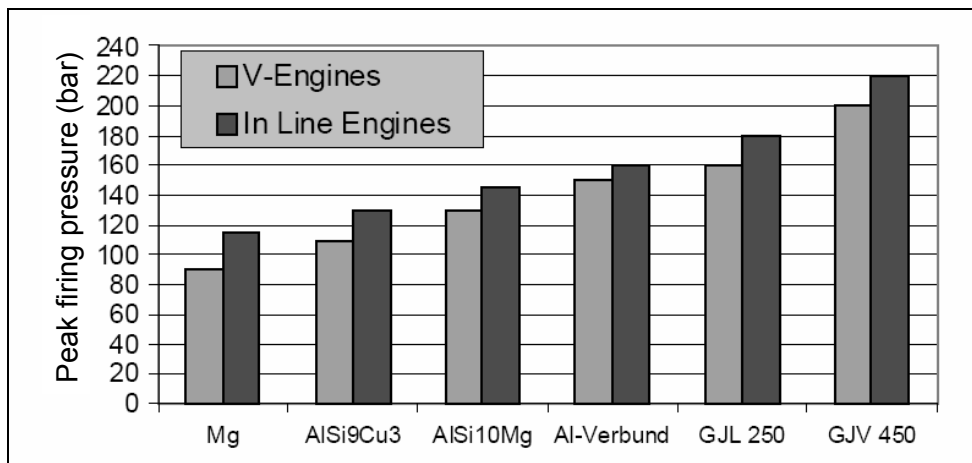
Obr. 4.5 Vliv nodularity na tepelnou vodivost [8]

Tvárná litina má mnohem lepší mechanické vlastnosti, než je tomu u vermikulární litiny. Avšak oproti vermikulární litině je náročnější na výrobu. Díky grafitu ve tvaru kuliček je u tvárné litiny výrazný pokles hodnoty tepelné vodivosti a útlumu. Oproti litině vermikulární má také větší sklon ke tvorbě staženin a ředin a proto musí být pro technologii navrženo nálitkování téměř jako u oceli [1].

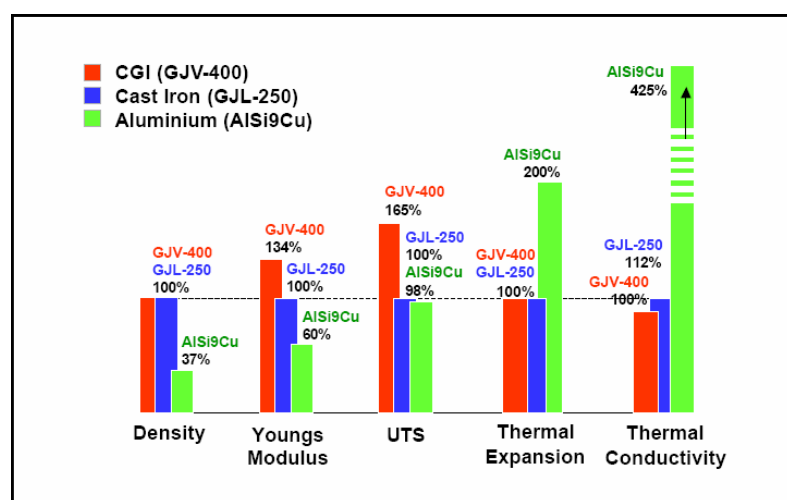
Velkou výhodou vermikulární litiny oproti litině tvárné je její tepelná vodivost. S rostoucí nodularitou v litině dochází k zhoršování podmínek pro přestup tepla [8].

4.1.3 Vermikulární litina a slitiny hliníku

Tyto dva materiály spolu soupeří především v oblasti výroby bloků a hlav spalovacích motorů. Slévárenské slitiny hliníku mají nižší hustotu a větší tepelnou vodivost než vermikulární litina. Avšak se zvyšujícími se požadavky na nárůst výkonu spalovacích motorů, který je možný pouze zvyšováním tlaku a teploty ve válcích motoru, dochází také k navyšování požadavků na pevnost a únavové vlastnosti materiálu. A právě zde, u motorů s vyšším výkonem, může vermikulární litina nahradit hliníkové slitiny jako materiál pro lité bloky [10].



Obr. 4.6 Maximální tlak spalování [10]



Obr. 4.7 Materiály používané pro bloky motorů[10]

4.2 Využití

Díky svým vlastnostem stojí litina s vermikulárním grafitem mezi litinou tvárnou a šedou. Oproti litině s lupínkovým grafitem je LVG pevnější, lépe odolává únavě, ale přitom má stále dobré hodnoty útlumu a tepelné vodivosti. To umožňuje nahradit šedou litinu za vermikulární a při stejné únosnosti strojního dílu může být použita menší tloušťka stěny a tím dojde k úspoře kovu a hmotnosti odlitku [7,11].

Typickými odlitky z vermikulární litiny jsou:

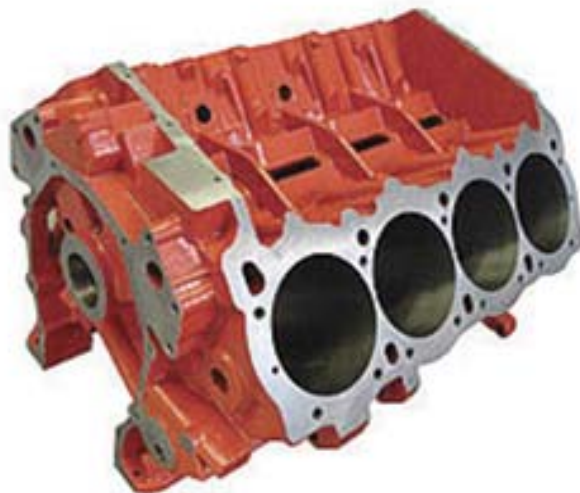
- bloky motorů a hlav válců u nákladních automobilů a dieselových motorů.
- skříně lodních, lokomotivových a stacionárních motorů
- brzdové segmenty osobních i nákladních automobilů
- ocelářské kokily do 60t
- rozvaděče a motory vysokotlaké hydrauliky



Obr. 4.8 Brzdový kotouč [15]



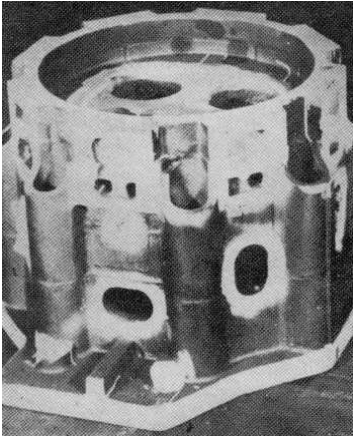
Obr. 4.9 Skříň kompresoru [16]



Obr. 4.10 Blok motoru [17]

4.3 Atlas odlitků [14]

4.3.1 Hlavy a bloky motorů, motorové a klikové skříně



Obr. 4.11 Hlava válce
lodního motoru (2000kg)
[14]

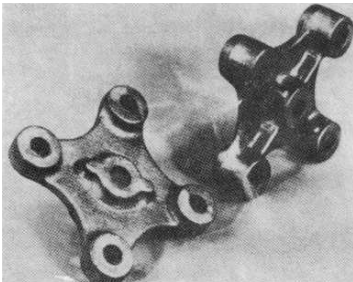


Obr. 4.12 Blok motoru pro
lokomotivy a nákladní
vozy [14]

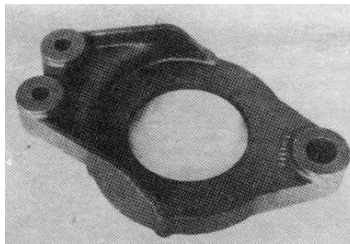


Obr. 4.13 Motor Rolls
Royce (cca 1000kg) [14]

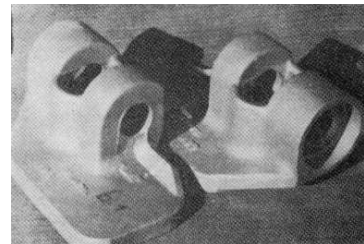
4.3.2 Konzoly a příruby



Obr. 4.14 Ložisková
konzole (2kg) [14]

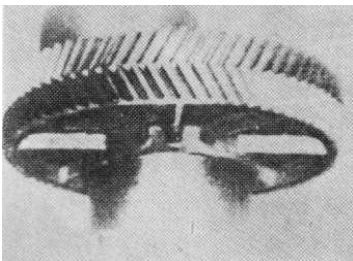


Obr. 4.15 Brzdová
konzole (9kg) [14]

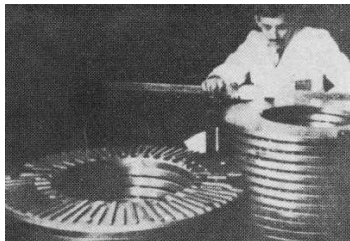


Obr. 4.16 Montážní
konzole pro přidavné
řízení traktoru (5,7kg) [14]

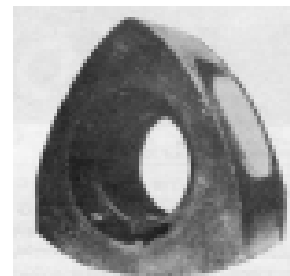
4.3.3 Rotační díly, písty, brzdové kotouče, ozubená kola



Obr. 4.17 Excentrické
ozubené kolo (450kg) [14]

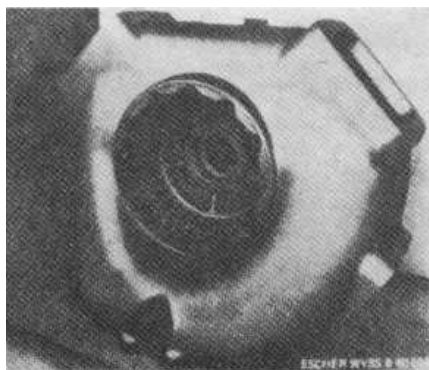


Obr. 4.18 Brzdové disky
rychlavlaku [14]



Obr. 4.19 Rotor
Wankelova motoru [14]

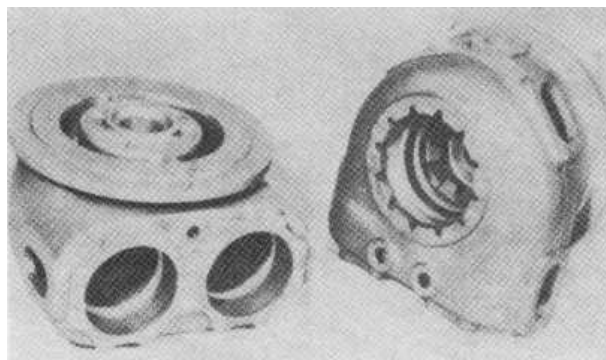
4.3.4 Skříně a součásti čerpadel a ventilátorů



Obr. 4.20 Skříň turbodmychadla (1100kg)
[14]



Obr. 4.21 Plnicí hrdlo turbodmychadla
[14]



Obr. 4.22 Skříň turbodmychadla (180kg) [14]

5 NUMERICKÁ SIMULACE MIKROSTRUKTURY A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ LITIN

5.1 Základní úkoly simulace [18]

Problematiku numerické simulace výroby odlitků lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

Simulace plnění: Umožňuje predikovat děje, které probíhají ve formě během plnění kovem. Lze sledovat:

- charakter proudění a postup fronty tekutého kovu
- zaplňování dutiny formy
- trasování částic tekutého kovu v objemu odlitku
- pokles teploty během lití
- funkci vtokové soustavy a výfuků
- rychlostní a tlakové pole kovu v dutině formy

Z výsledků lze posoudit, zda-li je zvolená technologie vhodná pro daný odlitek. Lze provádět změny geometrie odlitku, nebo vtokové soustavy a tím odladit celý proces výroby odlitku.

Simulace tuhnutí a chladnutí: Sleduje veškeré děje, které probíhají v odlitku po naplnění formy do ochladnutí odlitku. Z výsledků při tuhnutí a chladnutí lze posuzovat:

- postup fronty tuhnutí
- podíl fáze likvidu a solidu
- teplotní pole odlitku a vznik teplotních uzlů
- sledování smrštění a deformace během tuhnutí

Právě z výsledků simulace při tuhnutí a chladnutí lze předpovědět budoucí strukturu odlitku a následně určit mechanické vlastnosti.

5.2 Simulace mikrostruktury litin [18]

Hlavním úkolem simulace mikrostruktury je zjištění podílů strukturních a fázových složek v odlitku, jako jsou:

- primární austenit
- primární grafit
- austenit a grafit obsažený v eutektiku (v případě tuhnutí podle stabilního systému Fe – C)
- austenit a cementit v ledeburitickém eutektiku (v případě tuhnutí podle metastabilního systému Fe – Fe₃C)
- ferit a perlit
- celkový obsah grafitu a austenitu v odlitku

Dalším významným úkolem simulace je zjištění tvarových a rozměrových parametrů u daných strukturních složek. Jedná se především o:

- poloměr zrna austenitu, grafitu, rozměry dendritu
- vzdálenost sekundárních os dendritů (SDAS – Secondary Dendrite Arm Spacing)
- poloměr zrna feritu a perlitu
- disperzita perlitu
- počet eutektických buněk
- hustota grafitu v eutektické buňce

5.3 Simulace mechanických a fyzikálních vlastností litin [18]

Na základě výsledků o simulaci struktury je možné predikovat hodnoty mechanických vlastností. Tímto způsobem lze zjišťovat:

- mez kluzu
- pevnost v tahu
- prodloužení
- tvrdost podle Brinnella

Z fyzikálních vlastností, které je možné predikovat, má největší význam hustota vzniklé slitiny.

5.4 Matematický model užitý v softwaru ProCAST [19]

5.4.1 Změny ve verzi 2011 oproti verzi 2010

Hlavním princip při modelování struktury a mechanických vlastností spočívá ve zjištění teplot fázových přeměn. V předchozí verzi se pro zjištění těchto hodnot užívalo jednoduchých vzorců. Ve verzi 2011 jsou teploty fázových přeměn zjišťovány na základě termodynamických výpočtů, do kterých vstupuje faktor chemického složení. Takto zjištěná data jsou přesnější a mnohem lépe odpovídají skutečnosti.



Obr. 5.1 Ukázka výsledků podílu feritu ve struktuře v obou verzích [19]

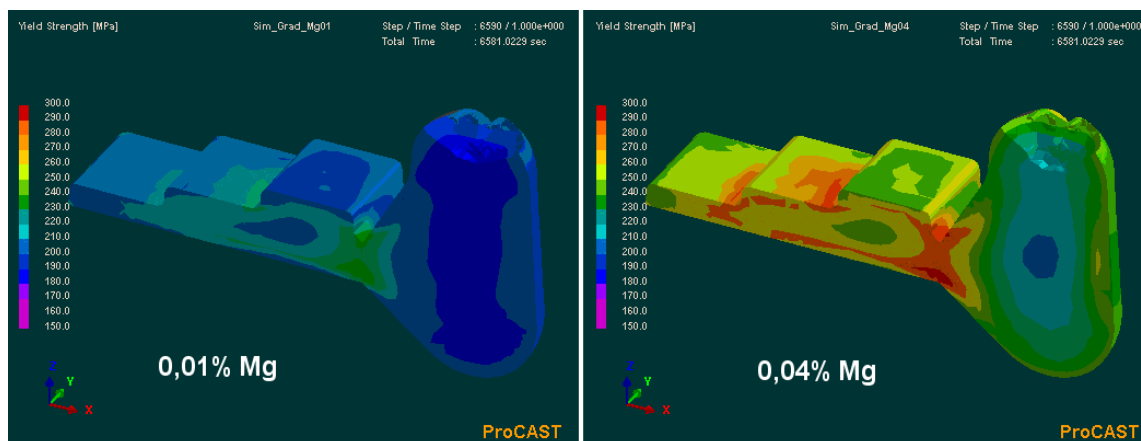
Ve verzi 2010 byla schopnost difuze uhlíku brána jako konstantní. Ve verzi 2011 je tato schopnost funkcí teploty tuhnoucího kovu.

Při výpočtu mechanických vlastností je počítáno s vlivem příměsí v litině (Ni, apod.) a také s vlivem nodularity.

5.4.2 Modelování vermikulární litiny

Z předchozích kapitol je známo, že litina s vermikulárním grafitem leží (z hlediska svých vlastností) mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem. A právě toho se využívá při zavádění zjednodušeného modelu pro simulaci mikrostruktury.

Základní předpoklad vychází z chemického složení. Obsah hořčíku se u vermikulární litiny pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,04%. Hodnoty menší, než je tento interval přísluší litině šedé a naopak hodnoty vyšší, jsou hodnoty typické pro tvárnou litinu. Při výpočtech je také operováno s odezníváním a s tím spojenou dobou modifikačního účinku. Jelikož okamžitě po modifikaci dochází k odeznívání modifikačního účinku, je nutné tuto skutečnost zohlednit v matematických modelech pro zjišťování mikrostruktury vermikulární litiny.



Obr. 5.2 Hodnoty meze kluzu v závislosti na množství hořčíku [19]

S množstvím hořčíku užitým pro modifikaci souvisí ještě jeden parametr a tím je nodularita. Nodularita má významný vliv na mechanické vlastnosti a se stoupajícím množstvím hořčíku hodnota nodularity stoupá. Právě proto se při výpočtech mechanických vlastností při simulacích operuje s tímto parametrem.

5.4.3 Výpočtový model

Při výpočtu mechanických vlastností se obecně uvažuje, že mechanické vlastnosti jsou funkcí těchto několika parametrů:

$$MP = f(f_i, MP_i, \text{grain_size}) \quad (5.1)$$

Kde:

MP – mechanická vlastnost (mez kluzu a pevnosti, tvrdost, prodloužení)

f_i – objemový zlomek fáze (austenit, perlit, ferit, grafit, ...)

MP_i – hodnota mechanické vlastnosti dané fáze

grain_size – velikost zrna

Pro výpočet celkových mechanických vlastností je tedy potřeba znát mechanické vlastnosti jednotlivých fázových složek obsažených v litině. Užité hodnoty jsou pro danou fázi uvedeny v tabulkách (Tab. 5.1 – 5.7):

Tab. 5.1 Mechanické vlastnosti feritu vzniklého z austenitu [19]

Ferit vzniklý z austenitu			
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [Mpa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Tvrdość [HB]
280	150	40	125

Tab. 5.2 Mechanické vlastnosti feritu vzniklého z eutektika [19]

Ferit vzniklý z eutektika			
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [Mpa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Tvrdość [HB]
482	331	26,2	54+37.[%Si]

Tab. 5.3 Mechanické vlastnosti perlitu vzniklého z austenitu [19]

Perlit vzniklý z austenitu			
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [Mpa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Tvrdość [HB]
860	500	10	200

Tab. 5.4 Mechanické vlastnosti perlitu vzniklého z eutektika [19]

Perlit vzniklý z eutektika			
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [Mpa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Tvrdość [HB]
991	587,8	5,6	167+31.[%Si]

Tab. 5.5 Mechanické vlastnosti metastabilní fáze [19]

Metastabilní fáze (ledeburit)			
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [Mpa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Tvrdość [HB]
750	750	0,5	400

Tab. 5.6 Mechanické vlastnosti austenitu [19]

Austenit			
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [Mpa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Tvrdość [HB]
280	150	5,6	125

Tab. 5.7 Mechanické vlastnosti grafitu [19]

Grafit			
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [Mpa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Tvrdość [HB]
280	150	40	125

Celkově se tedy daná mechanická vlastnost vypočte podle následujícího vzorce:

$$MP = \sum (f_i MP_i) + 5.0 (R_{\text{graphite}})^{0.5} \quad (5.2)$$

Kde:

MP – mechanická vlastnost (mez kluzu a pevnosti, tvrdost, prodloužení)

f_i – objemový zlomek fáze (austenit, perlit, ferit, grafit, ...)

MP_i – hodnota mechanické vlastnosti dané fáze

R_{graphite} – velikost grafitu

Z předchozích kapitol je jasné, že podstatný vliv na mechanické vlastnosti má velikost a tvar grafitu. Tato skutečnost je také reprodukována ve výše uvedeném vzorci.

6 SIMULACE PŘILITÝCH VZORKŮ A POROVNÁNÍ

Jelikož bylo provedeno více zkoušek u přilítých vzorků, než u vzorků odebraných přímo z odlitku, byly použity výsledky zkoušek přilítých vzorků pro validaci numerické simulace mechanických vlastností a struktury. Až po případné shodě výsledků simulace a zkoušek přilítých vzorků bude provedeno porovnání na vlastním odlitku.

6.1 Popis vzorků

Pro zjišťování mechanických vlastností je užito přilítých vzorků, které jsou napájeny stejným licím kulem jako samotný odlitek. Jako přilítých vzorků je užito:

- Y Blok 25mm – hodnocení meze pevnosti
- tyč pro zkoušku v tahu – hodnocení meze pevnosti, průměr 30mm, délka 250mm
- schodová zkouška – hodnocení meze pevnosti, struktury a nodularity
- spirála pro hodnocení zabíhavosti

Schodová zkouška: Pro určení závislosti mechanických vlastností a struktury na tloušťce stěny bylo užito právě tohoto vzorku. Jedná se o vzorek s odstupňovanou tloušťkou stěn postupně v hodnotách 6, 8, 12, 16, 20, 24, 30 a 40mm. Schod o tloušťce 24mm byl na modelové zařízení umístěn z důvodu velkého rozpětí mezi tloušťkami 30 a 40mm.

Pro validaci výsledků simulace byly použity tedy hodnoty meze pevnosti určené z Y bloku, tyče pro zkoušku tahem a schodové zkoušky o tloušťce stěny 20 a 24mm. Pro validaci podílu feritu a perlitu ve struktuře a nodularity bylo užito schodového klínu v celém rozsahu tloušťky stěn.



Obr. 6.1 Odlité vzorky

6.2 Modelování a simulace

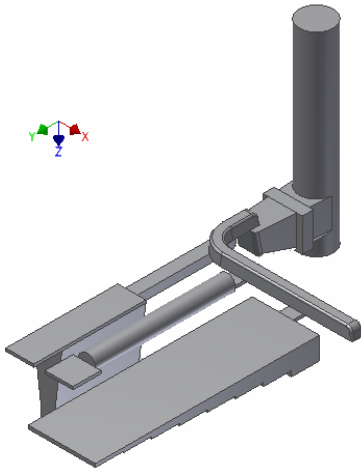
6.2.1 Geometrický model přilítých vzorků

Při modelování vzorků bylo předpokládáno, že odlitek nijak neovlivňuje tepelné poměry při chladnutí vzorků. Tím pádem je možné vzorky simulovat odděleně od odlitku. Stejně tak byl zanedbán tepelný vliv spirály pro hodnocení zabíhavosti na vzorky a tím se výrazně usnadnilo modelování a zkrátil výpočetní čas potřebný pro simulaci.

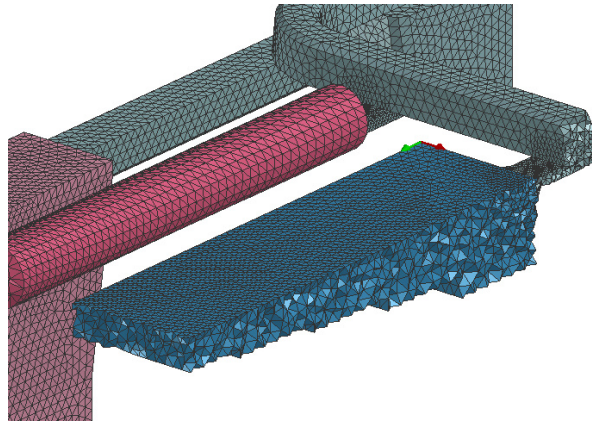
Model vzorků byl vytvořen ve studentské verzi Autodesk Inventor Professional 2012. Následně již byla v softwaru ProCAST vytvořena výpočetní síť. Parametry výpočetní sítě jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6.1).

Tab. 6.1 Parametry výpočetové sítě

Počet částí	7
Počet uzlů	441259
Počet elementů	2449775
Rozměry modelu [mm]	530x917x569



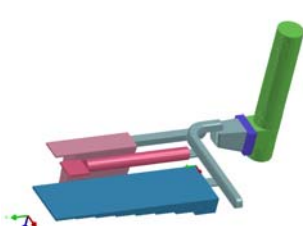
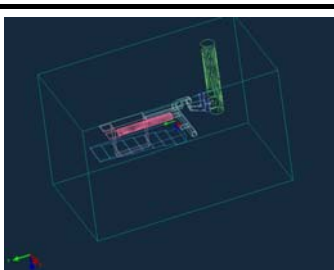
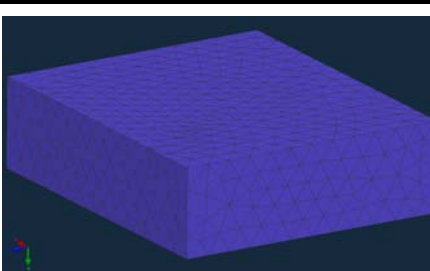
Obr. 6.2 Model přilíých vzorků



Obr. 6.3 Ukázka povrchové a objemové sítě

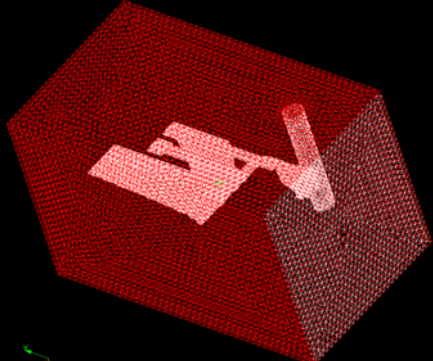
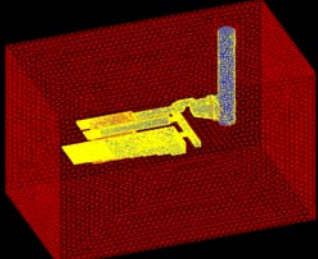
6.2.2 Počáteční a okrajové podmínky

Tab. 6.2 Počáteční podmínky

Model	Obrázek	Materiál	Teplota [°C]
Odlitek		Vermikulární litina	1350 (licí teplota)
Forma		Bentonitová směs	30
Filtr		Sedex 50x100x22	1350

Volba počátečních a okrajových podmínek je závislá na poměrech, které probíhají při skutečném lití. Přehledně jsou tyto podmínky shrnuty v tabulkách (Tab. 6.2 a 6.3). Při definici okrajové podmínky ochlazování povrchu formy okolím bylo zohledněno to, že forma ze strany vtokového kůlu nekončí, neboť právě zde se nachází odlitek.

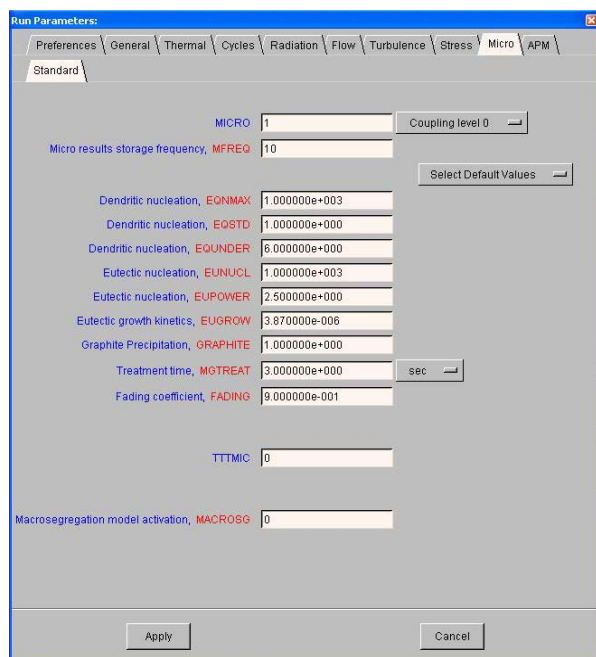
Tab. 6.3 Okrajové podmínky

Typ	Obrázek
Heat – ochlazování vzduchem	
H.T.Coeff. – koeficient přestupu tepla Odlitek – Forma $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	

6.2.3 Parametry simulace pro výpočet mechanických vlastností

Pro zjednodušení bylo simulováno pouze tuhnutí a chladnutí. Bylo provedeno vždy pět simulací, kde byl měněn obsah zbytkového hořčíku v rozsahu 0,015 až 0,035% a to jak pro verzi 2010 tak 2011. Tyto simulace tak pokryly celý rozsah zbytkového hořčíku, jenž se může vyskytovat ve vermikulární litině v podmínkách slévárny Heunisch, s.r.o.

Nastavení je závislé na užitém materiálu. Jedná se především o parametry týkající se charakteru nukleace primární fáze a eutektika. Také je zde možnost měnit parametry týkající se modifikačního účinku hořčíku – využití a odeznívání



Obr. 6.4 Modul Micro

modifikačního účinku ve formě. Vzhledem k tomu, že je ve vermikulární litině obsažen hořčík, bylo pro nastavení těchto parametrů užito předdefinované volby pro litinu s kuličkovým grafitem.

6.3 Zpracování naměřených dat

Roztřídění dle předpokládaného chemického složení: Vzhledem k tomu, že proces výroby vermikulární litiny je v prostředí slévárny Heunisch, s.r.o. stále ve fázi experimentů, tak mají zjištěná data značný rozptyl. Proto je nutné hodnotit zjištěné hodnoty na základě data tavby, kdy byla daná modifikace provedena. Na základě porovnání meze pevnosti daného vzorku a výsledků simulace byly jednotlivé tavby zařazeny do několika tříd s odstupňovaným množstvím zbytkového hořčíku. Jedná se o pět tříd, kde se obsah zbytkového hořčíku pohybuje od 0,015 do 0,035%. Jedná se o stejné chemické složení, jaké bylo užito v simulacích. Tyto třídy pak slouží jak pro porovnání meze pevnosti tak strukturních vlastností. Tento způsob byl zvolen proto, že dané tavbě není přiřazeno jasné chemické složení.

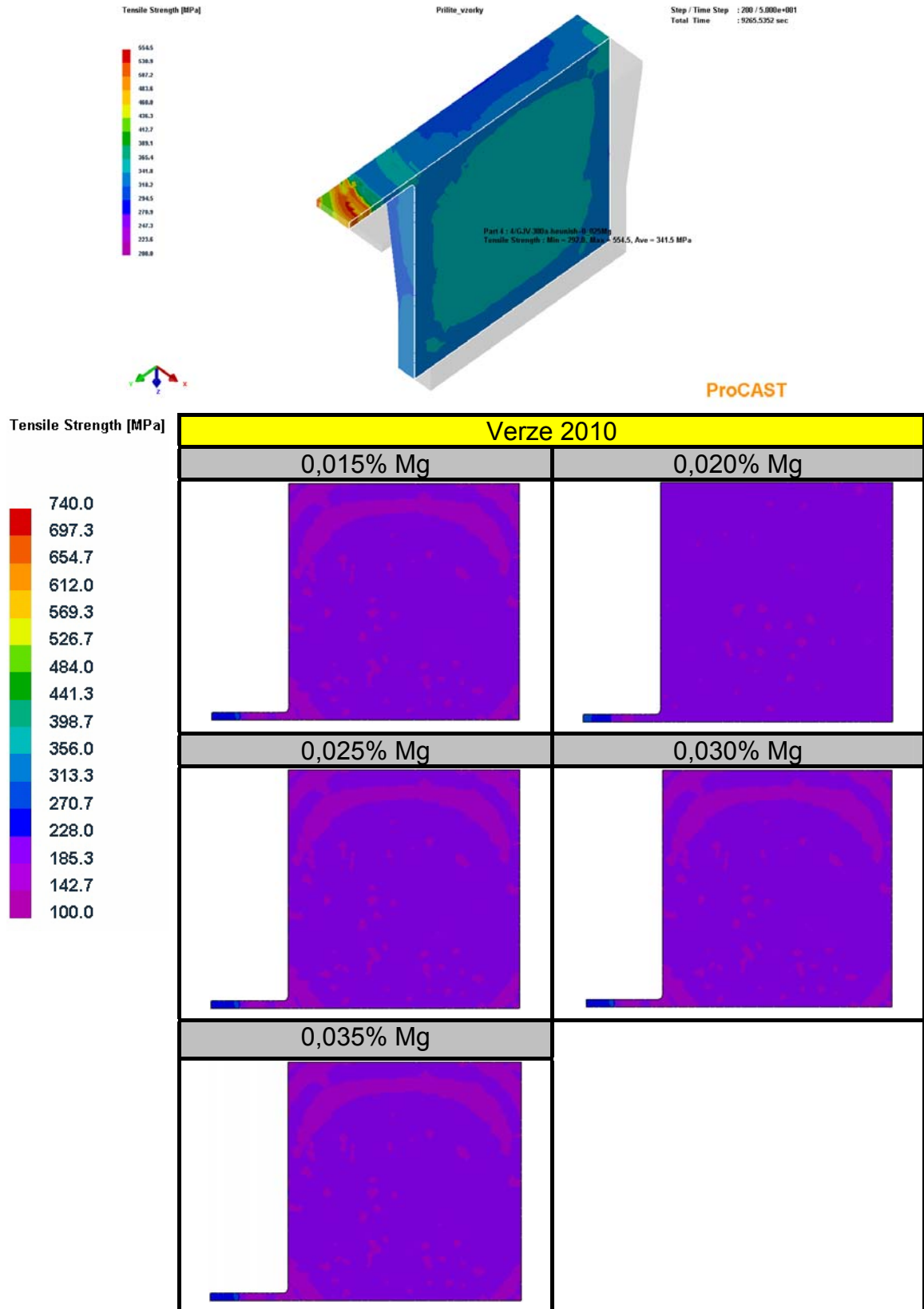
Další statistické zpracování bylo provedeno pro zjištěné hodnoty meze pevnosti, neboť při vyhodnocování dochází k porovnávání číselných výsledků střední hodnoty zjištěné při simulacích. U strukturních vlastností nebylo prováděno statistické hodnocení a to z důvodu malého počtu hodnot pro každý soubor. Pro statistické vyhodnocení bylo užito statistického softwaru MINITAB 14. Veškeré statistické testování je provedeno s hladinou významnosti $\alpha=0,05$, tj. s pravděpodobností 95%.

Grubbsův test odlehlých hodnot: Grubbsovu testu byly podrobeny soubory, které měly více jak dvě hodnoty. Soubory, které byly po testu složeny z méně jak tří hodnot, nebyly dále statisticky zpracovány.

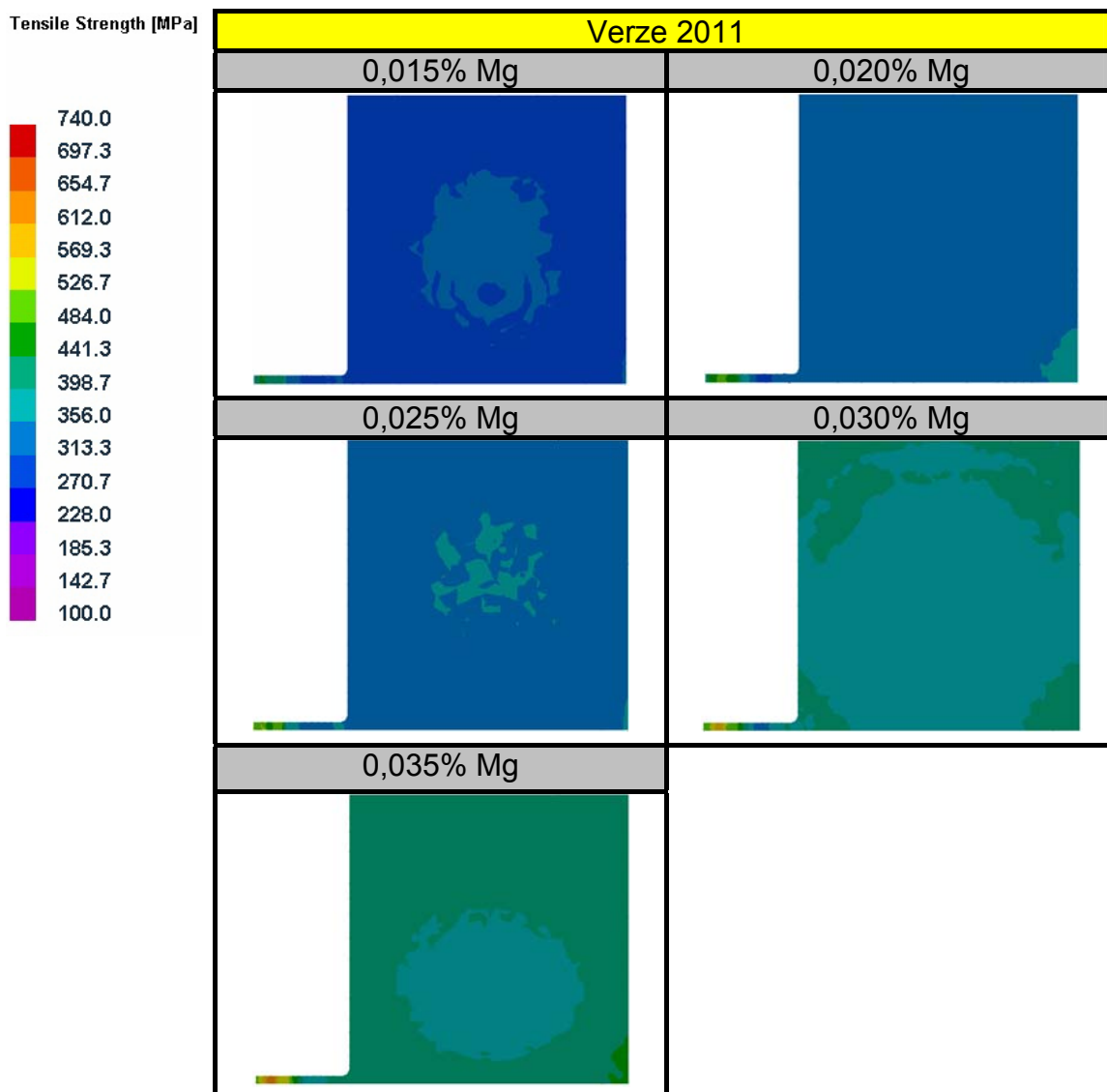
Test normality dat, určení střední hodnoty a směrodatné odchylky: Dále bylo u souborů, které byly ošetřeny Grubbsovým testem, testován předpoklad normálního rozložení dat a pro soubory s normálním rozdělením byla zjištěna střední hodnota a směrodatná odchylka.

Číselné hodnoty meze pevnosti u všech vzorků a z výsledků simulace jsou přehledně uvedeny v tabulkách (Tab. 6.4 až 6.6). Naměřené hodnoty jsou reprezentovány střední hodnotou a směrodatnou odchylkou a to pro každou třídu dle předpokládaného chemického složení. Soubory, kde není zamítnuta hypotéza o normálním rozdělení dat, jsou označeny zelenou barvou. Soubory, kde je hypotéza o normálním rozdělení zamítnuta, jsou označeny oranžovou barvou. Soubory neoznačené obsahují méně jak tři hodnoty a proto nebyly statisticky vyhodnocovány.

Y blok: Stejně tak, jako u tyče pro zkoušku v tahu, bylo i v tomto případě užito vyhodnocení maximální, minimální a střední hodnoty meze pevnosti a pro všechny vzorky je volena stejná stupnice.

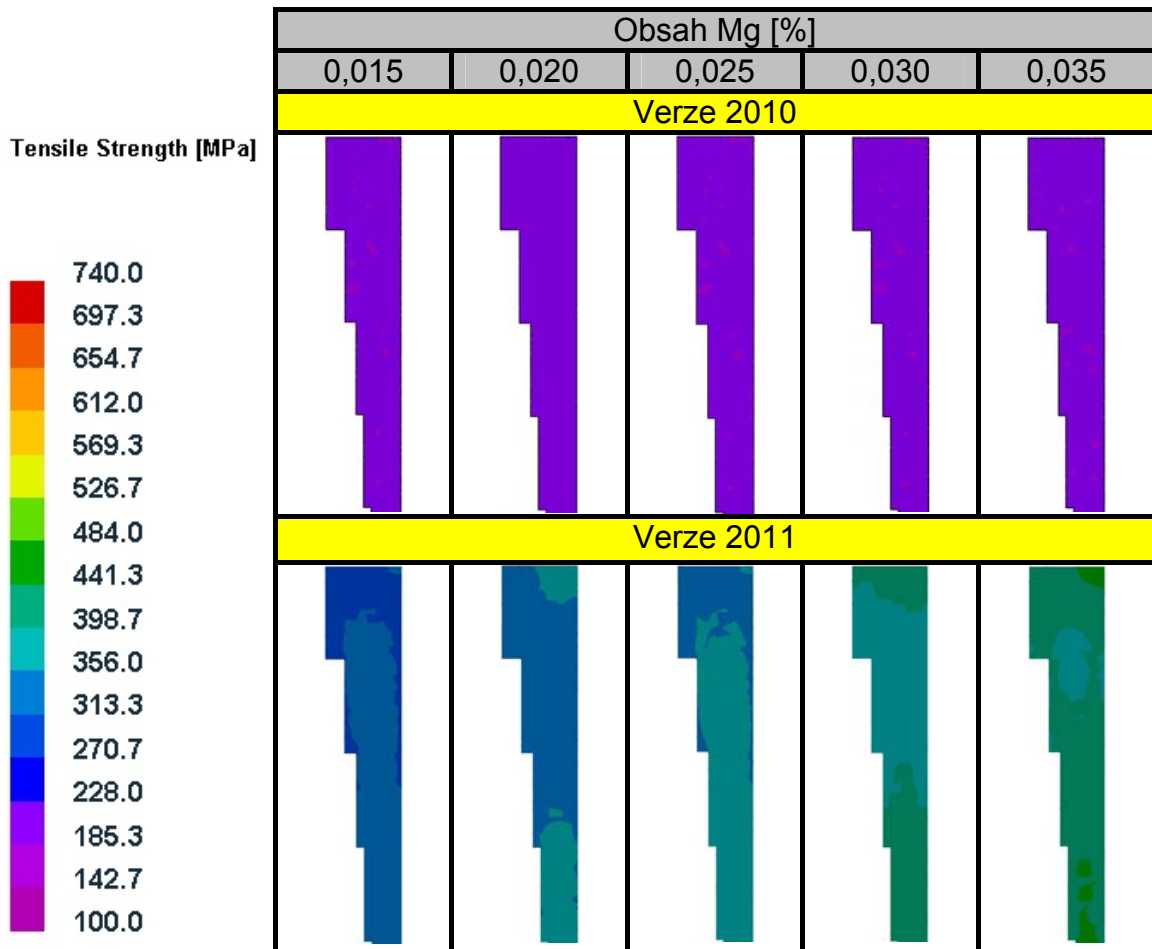
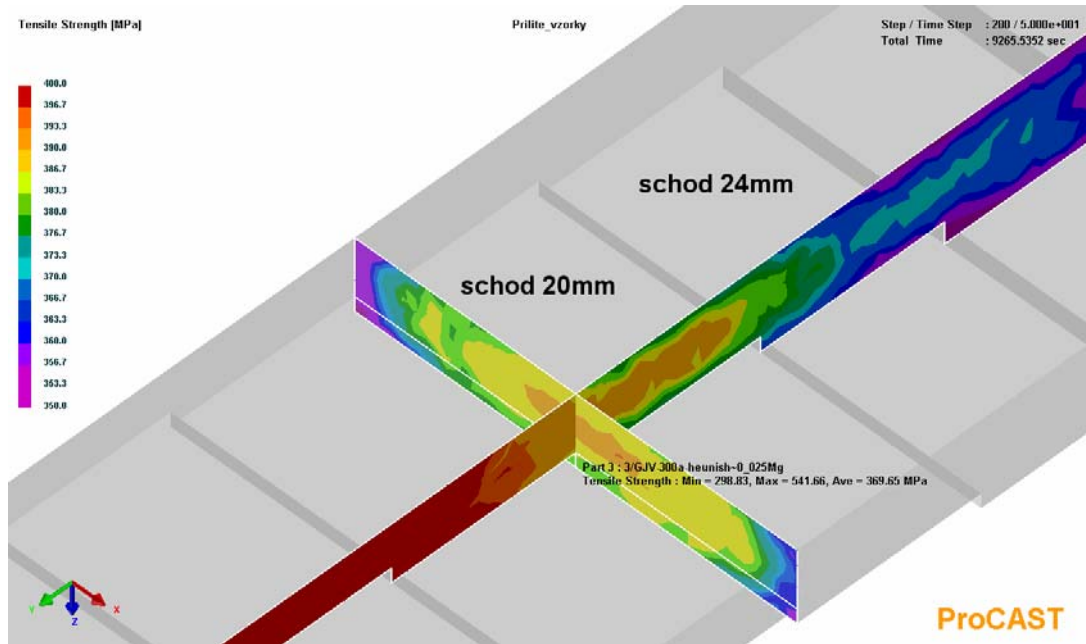


Obr. 6.6 Vyhodnocení meze pevnosti Y bloku – verze 2010



Obr. 6.7 Vyhodnocení meze pevnosti Y bloku – verze 2011

Schodová zkouška: Při vyhodnocování schodové zkoušky byla vizuálně zjištěna maximální a minimální hodnota v řezu schodů o tloušťce 20 a 24 mm. Jako střední hodnota je brán aritmetický průměr těchto dvou hodnot. Toto zanedbání bylo možné použít, neboť rozsah maximální a minimální hodnoty je malý.



Obr. 6.8 Vyhodnocení meze pevnosti schodů 20 a 24mm

Tab. 6.4 Hodnoty Rm – Tyč pro zkoušku tahem [MPa]

	Obsah Mg [%]				
	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035
Simulace – verze 2010					
Min	165	166	165	165	165
Max	303	315	303	303	303
Střední	211	225	211	211	211
Simulace – verze 2011					
Min	297	338	338	379	400
Max	474	590	554	685	733
Střední	330	391	381	451	481
Přilité vzorky					
Střední	164	406		475	581
Sm. odchylka	30	34		15	80

Tab. 6.5 Hodnoty Rm – Schody 20, 24mm [MPa]

	Obsah Mg [%]				
	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035
Simulace – verze 2010					
Min	171	165	166	166	165
Max	225	234	225	225	224
Střední	198	200	196	196	195
Simulace – verze 2011					
Min	302	341	353	386	412
Max	346	373	395	430	456
Střední	324	357	374	408	434
Přilité vzorky					
Střední	136	373		414	500
Sm. odchylka	1	10		22	27

Tab. 6.6 Hodnoty Rm – Y Blok [MPa]

	Obsah Mg [%]				
	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035
Simulace – verze 2010					
Min	152	155	152	152	152
Max	303	314	303	303	303
Střední	200	205	196	196	196
Simulace – verze 2011					
Min	259	306	292	348	368
Max	472	588	555	663	660
Střední	301	342	341	388	412
Přilité vzorky					
Střední	132	369		–	575
Sm. odchylka	13	3		–	4

6.4.2 Strukturní vlastnosti

Hodnocení nodularity a základních strukturních složek bylo provedeno vizuálně pro každý schod. Vyhodnocení bylo provedeno ve střední oblasti schodového klínu a výstupem je vždy střední hodnota vypočtená jako aritmetický průměr maximální a minimální hodnoty. Číselné hodnoty jsou přehledně uvedeny v tabulce (Tab. 6.7). Při hodnocení podílu feritu a perlitu jsou v tabulce uvedeny pouze hodnoty perlitu. Množství feritu je dáno tímto vztahem:

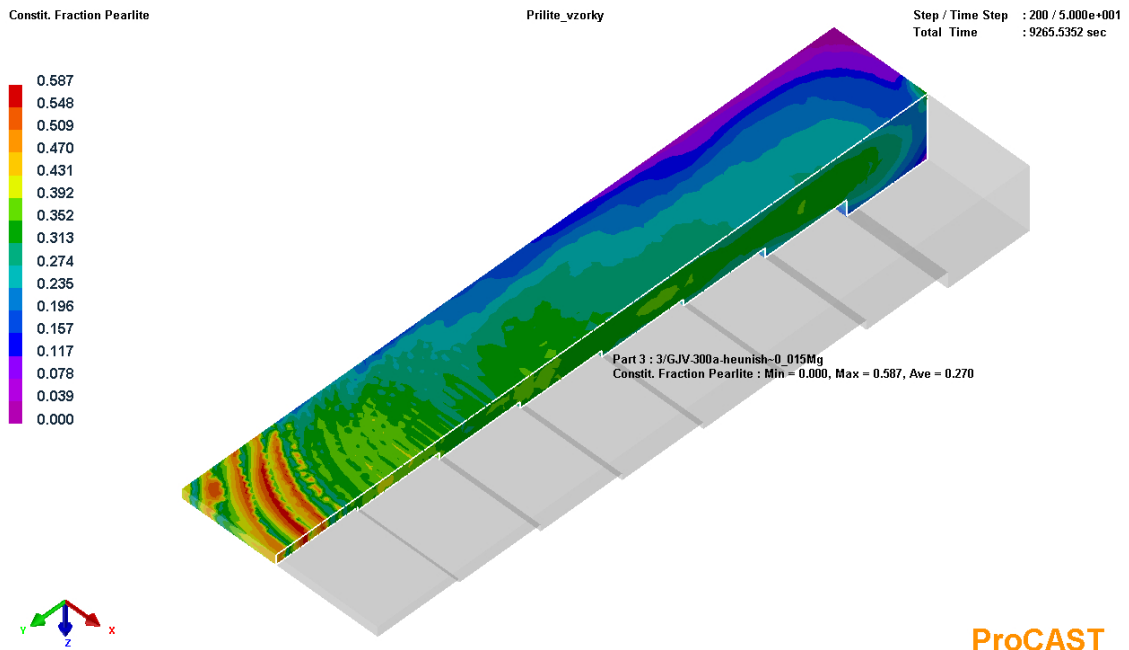
$$F = 100 - P [\%] \quad (6.1)$$

Kde:

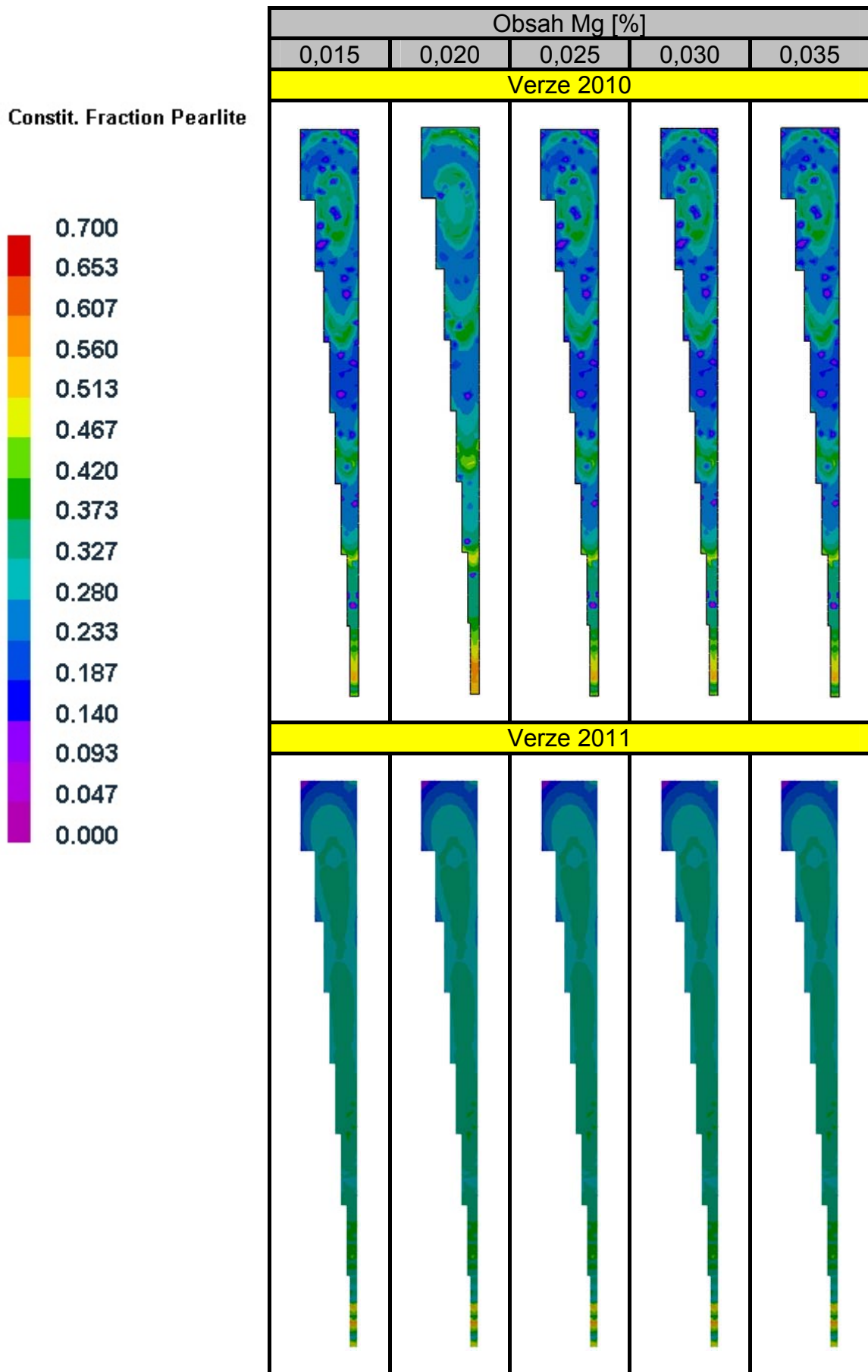
F – podíl feritu [%]

P – podíl perlitu [%]

Podíl feritu a perlitu:

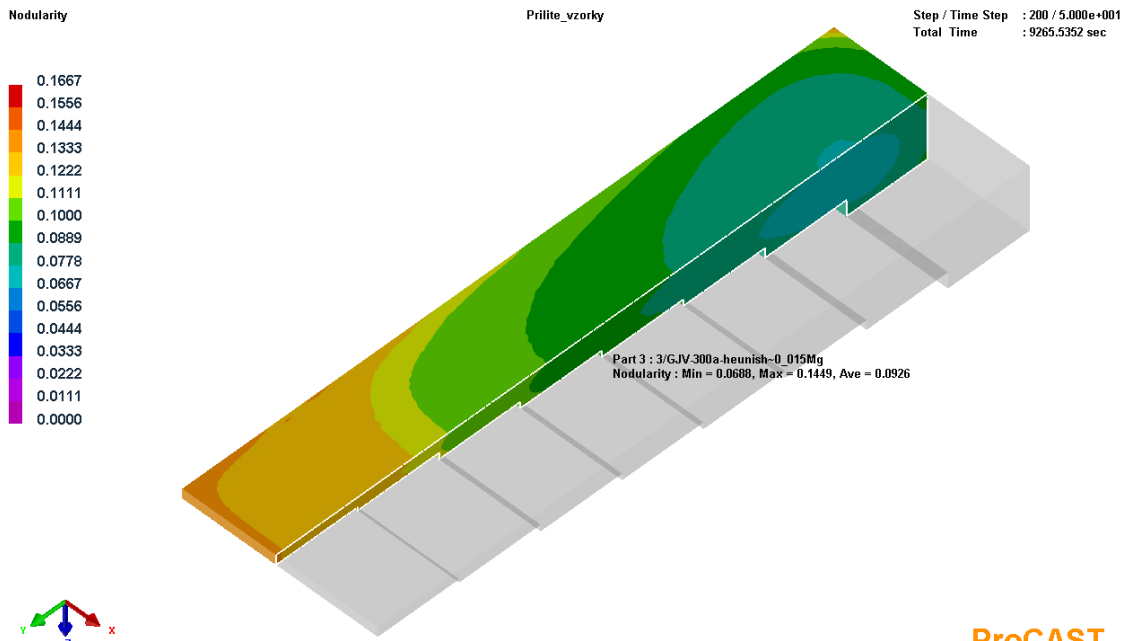


Obr. 6.9 Vyhodnocení podílu perlitu – schody

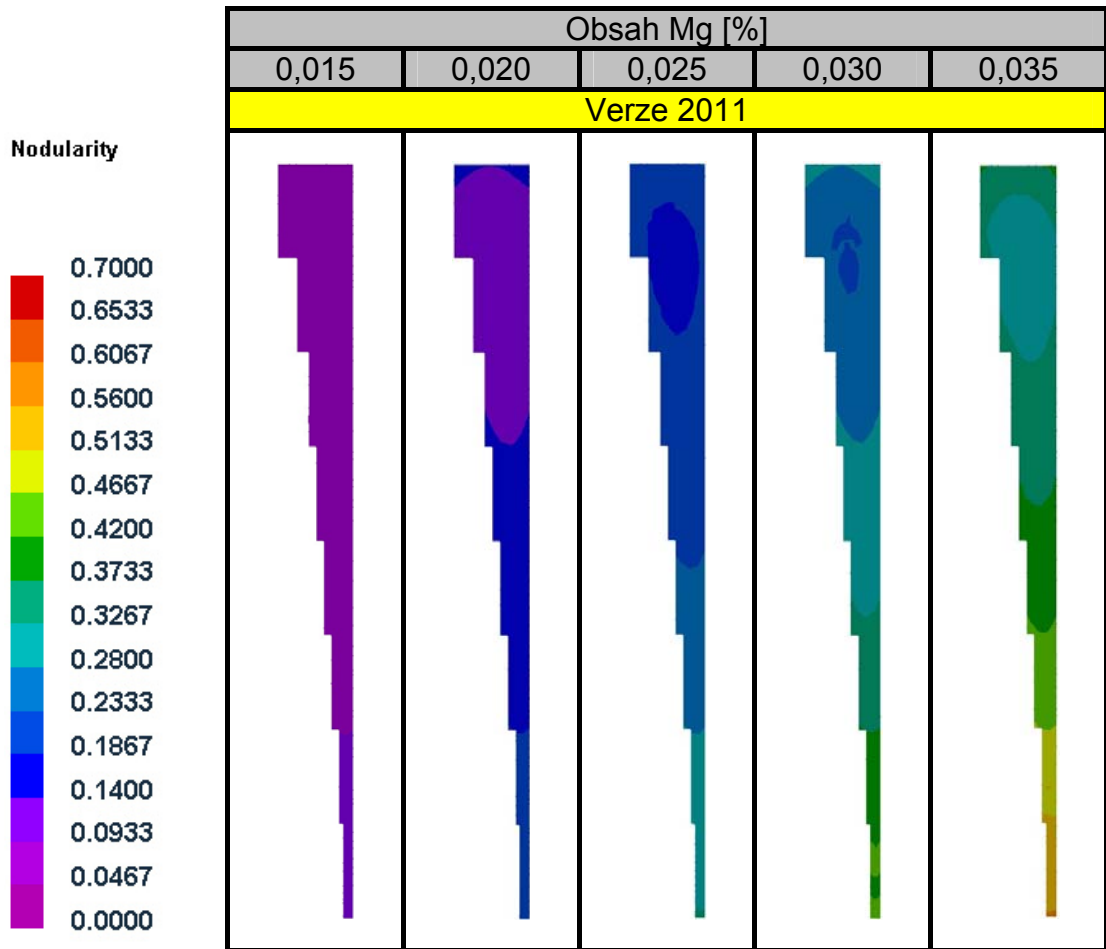


Obr. 6.10 Vyhodnocení podílu perlitu – schody (pokračování)

Nodularita:



ProCAST



Obr. 6.11 Vyhodnocení nodularity – schody

Tab. 6.7 Hodnoty strukturních vlastností – Schody [%]

Tloušťka schodu [mm]:	Podíl perlitu					Nodularita				
	Obsah Mg [%]					Obsah Mg [%]:				
	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035
Simulace – verze 2010										
6	44	44	44	44	44	–	–	–	–	–
8	34	34	34	34	34	–	–	–	–	–
12	29	29	29	29	29	–	–	–	–	–
16	34	34	34	34	34	–	–	–	–	–
20	37	37	37	37	37	–	–	–	–	–
24	29	29	29	29	29	–	–	–	–	–
30	29	29	29	29	29	–	–	–	–	–
40	29	29	29	29	29	–	–	–	–	–
Simulace – verze 2011										
6	48	54	44	57	57	15	27	43	53	67
8	37	40	36	40	40	13	24	37	49	61
12	32	24	31	34	34	12	22	35	47	56
16	33	29	31	34	29	10	20	30	42	50
20	32	29	25	28	29	9	19	30	40	50
24	28	29	25	28	29	9	16	27	38	44
30	28	29	25	28	29	8	15	27	35	42
40	24	29	25	28	29	8	17	25	35	44
Přilité vzorky										
6	–	51,1	–	–	–	31	49,4	36,7	–	–
8	–	42,2	–	–	–	23,8	40,1	30,4	–	–
12	–	35,9	–	–	–	20,8	28,4	28,9	–	–
16	–	33,8	–	–	–	15,4	22	27,5	–	–
20	–	33,7	–	–	–	9,4	17,9	40,3	–	–
24	–	–	–	–	–	8,1	–	28,2	–	–
30	–	24,9	–	–	–	8,5	11,4	26,6	–	–
40	–	18,1	–	–	–	7,15	16,5	31,5	–	–

6.5 Vyhodnocení výsledků

6.5.1 Mez pevnosti

V okrajových oblastech, kde je množství zbytkového hořčíku 0,015 a 0,035% dochází k poměrně značným odchylkám. Hodnoty meze pevnosti vzorků se zvoleným chemickým složením 0,015% zbytkového hořčíku odpovídá spíše stavu, kdy není v litině obsažen žádný hořčík. Naopak u předpokládaného chemického složení s 0,035% zbytkového hořčíku odpovídají hodnoty meze pevnosti ve vzorcích spíše litině s kuličkovým grafitem. To může být způsobeno nevhodným zvolením předpokládaného chemického složení, nebo místním přemodifikováním, případně rychlým odezněním modifikačního účinku. Pro ověření této skutečnosti je doporučeno provést simulace také pro hodnoty s obsahem zbytkového hořčíku nad 0,035% a pod 0,015%, případně provést simulaci také úplně bez zbytkového hořčíku.

Při obsahu zbytkového hořčíku v rozměni 0,020 až 0,030% hodnoty simulací odpovídají hodnotám z přilížitých vzorků.

Výsledky simulace ve verzi 2010 vůbec nereagují na změnu hořčíku a až do hodnoty 0,035% vykazují hodnoty jako pro LLG. Teprve při hodnotách 0,040% dochází k nárůstu mechanických vlastností, jelikož software vyhodnotil chemické složení jako u LKG.

Statistické hodnocení: U souborů, kde nebyla zamítnuta hypotéza o normálním rozdělení byla testována rovnost středních hodnot u přilížitých vzorků a středních hodnot zjištěných simulací. Rozhodujícím kritériem je p – hodnota. V případě, že je p – hodnota menší než 0,05 tak je zamítnuta hypotéza H0 (střední hodnoty se rovnají), v opačném případě není možno tuto hypotézu zamítnout.

Tab. 6.8 Testování hypotéz o rovnosti středních hodnot

Obsah Mg [%]	Zkušební vzorky		Simulace	P-hodnota [-]	Hypotéza:
	Střední hodnota [MPa]	Sm. odchylka [MPa]	Střední hodnota [MPa]		Rovnost středních hodnot
Tyč pro zkoušku tahem					
0,015	164	30	330	0,000	ZAMÍTNUTA
0,020	406	34	391	0,268	NEZAMÍTNUTA
0,025			381	0,081	NEZAMÍTNUTA
0,030	475	15	451	0,025	ZAMÍTNUTA
0,035	581	80	481	0,049	ZAMÍTNUTA
Schody 20, 24mm					
0,030	414	22	408	0,447	NEZAMÍTNUTA
Y blok 25mm					
0,015	132	13	301	0,000	ZAMÍTNUTA

Cca 40% z celkového množství souborů má méně než tři hodnoty, proto nemohly být statisticky zpracovány. U všech souborů, které mají tři a více hodnot nebylo třeba odstraňovat žádné odlehlé hodnoty. Pouze jeden ze sedmi souborů neměl normální rozdělení, avšak ve většině případů nízká p – hodnota ukazuje na nepříliš kvalitní počáteční data.

Hypotéza rovnosti středních hodnot nebyla zamítnuta pouze ve třech případech ze sedmi. V případě, že budou vyloučeny soubory z okrajových oblastí, je hypotéza rovnosti středních hodnot nezamítnuta ve třech případech ze čtyř.

Z výsledků plyne, že je možné užití simulaci pro predikci meze pevnosti a tím i ostatních mechanických vlastností. Je nutné však provést kontrolu na dostatečném množství vzorků, aby byla zaručena patřičná kvalita statistického zpracování dat a také je nutné znát přesné chemické složení.

6.5.2 Strukturní vlastnosti

Podíl Perlitu: podíl perlitu byl hodnocen na každém schodu, kde je rozsah podílu perlitu reprezentován vizuálně zjištěnou maximální a minimální hodnotou. Poté byla vypočtena střední hodnota jako aritmetický průměr.

Výsledky podílu perlitu zjištěné simulací ve verzích 2010 a 2011 a výsledky z přilítých vzorků se shodují. U verze 2011 je patrný mírný nárůst podílu perlitu ve struktuře v závislosti na rostoucím množství zbytkového hořčíku, kdežto u verze 2010 zůstává hodnota neměnná.

Hodnoty podílu feritu a perlitu zjištěné simulací odpovídají výsledkům z přilítých vzorků a proto je možné užití simulaci pro predikci struktury u reálného odlitku.

Nodularita: Nodularita byla hodnocena podobně jako tomu bylo u hodnocení podílu perlitu – vizuálním určením minimální a maximální hodnoty na daném schodu a spočtením střední hodnoty.

Ve verzi 2010 při hodnotách zbytkového hořčíku pod 0,040% vůbec nedošlo k vyhodnocení nodularity, až při hodnotě 0,040% se tento parametr objevuje mezi výsledky vlastností. Z toho vyplývá, že verze 2010 je schopna predikovat nodularitu pouze v oblasti tvárné litiny. Při hodnotách zbytkového hořčíku pod 0,040% není nodularita vůbec vyhodnocována.

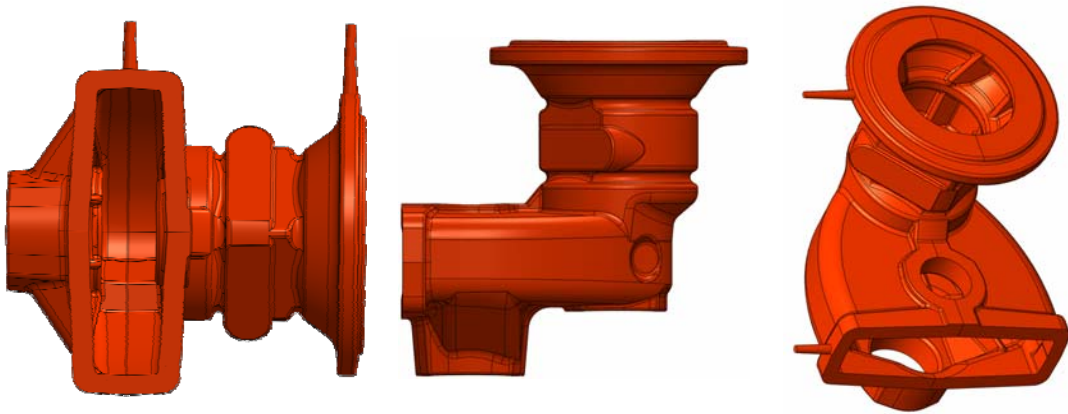
Při simulacích ve verzi 2011 je parametr nodularity vyhodnocován od nejnižší hodnoty zbytkového hořčíku a se stoupající hodnotou zbytkového hořčíku dochází k nárůstu nodularity a to v rozsahu 0 až 70%. Hodnoty získané vyhodnocením simulace v tenkých schodech (do 12mm) při obsazích zbytkového hořčíku do 0,020% jsou menší, než je tomu u přilítých vzorků. Toto může být způsobeno nehomogenním rozložením modifikačního účinku v odlitku.

Hodnoty nodularity zjištěné simulací odpovídají výsledkům z přilítých vzorků a proto je možné užití simulaci pro predikci nodularity u reálného odlitku.

7 SIMULACE REÁLNÉHO ODLITKU A POROVNÁNÍ

Jelikož výsledky mechanických a strukturních vlastností u přilížitých vzorků se poměrně dobře shodují s výsledky simulací, je možné provést porovnání výsledků simulace odlitku s konkrétními hodnotami strukturních a mechanických vlastností zjištěných přímo z odlitku. Výsledkem této kapitoly bude, zda-li je možné užít simulaci pro predikci mechanických a strukturních vlastností budoucího odlitku.

Pro simulaci byl vybrán odlitek zadní nápravy traktoru z vermikulární litiny. Jako materiál pro tento odlitek byla dříve používána litina s lupínkovým grafitem (GJL – 250), avšak při funkčním zatížení docházelo k porušení součásti. Proto byla jako alternativa zvolena vermikulární litina GJV – 300, která má o 50 Mpa větší mez pevnosti a vyšší hodnotu meze únavy.



Obr. 7.1 Geometrie odlitku

7.1 Místa odběru vzorků

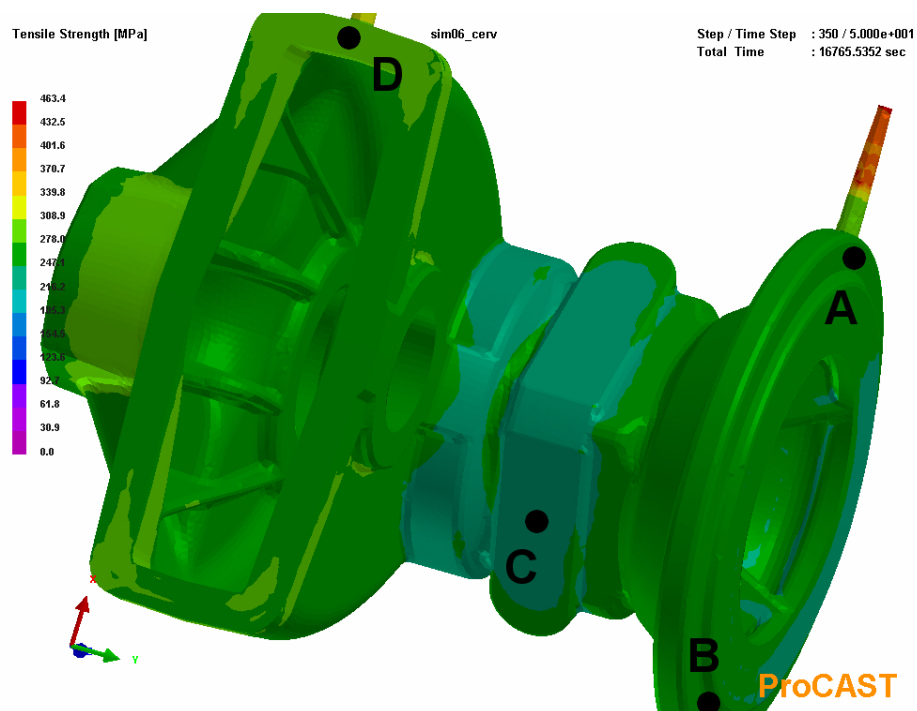
Místa pro odběr vzorků jsou volena v závislosti na funkčních požadavcích na odlitek a slouží pro stanovení meze pevnosti v tahu, podílu feritu a perlitu a nodularity. Pro vlastní hodnocení meze pevnosti je užita metoda magnetických vln. Místa pro odběr vzorků jsou tyto body:



Obr. 7.2 Místa odběru vzorků z odlitku (zleva: A, C, D)

- bod A, příruba ve spodní části formy, tloušťka stěny 24mm
- bod B, příruba ve vrchní části formy, tloušťka stěny 24mm
- bod C, opracovávaná plocha, tloušťka stěny 20mm
- bod D, příruba odlitku

Umístění vlastních měřených bodů je přehledně znázorněno na obr 7.2 a 7.3.



Obr. 7.3 Odběrová místa – simulace

7.2 Modelování a simulace

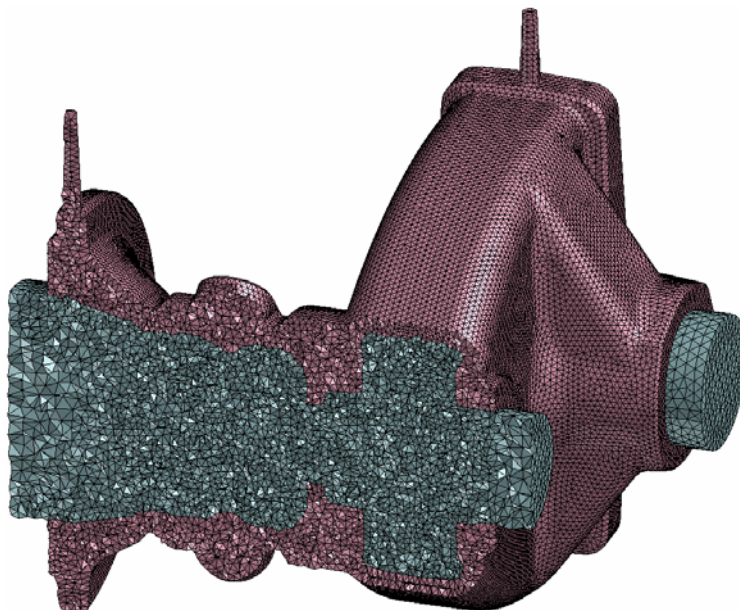
Jelikož se v předchozí kapitole (kap.6) ukázalo, že výsledky verze 2010 neodpovídají skutečnosti, je při simulaci odlitku použita verze 2011. Ačkoliv nebyly měřeny hodnoty vlastností ve všech odběrných místech, tak výsledky simulací jsou uvedeny pro všechna odběrná místa a to z důvodu možnosti pozdějšího porovnání s naměřenými hodnotami jak meze pevnosti, tak strukturních vlastností.

7.2.1 Geometrický model odlitku

Při modelování a simulaci je užito varianty, kdy jsou ve formovacím rámu umístěny symetricky dva odlitky. Výpočetní síť odlitku byla převzata od firmy MECAS z předchozích simulací prováděných na tomto odlitku ve starší verzi simulačního programu a pro jiné materiály.

Tab. 7.1 Parametry výpočtové sítě

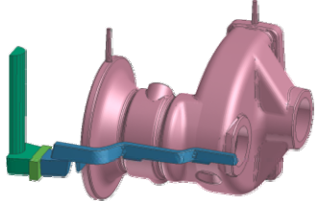
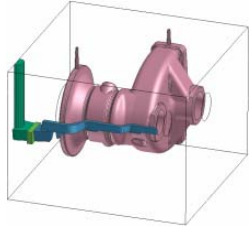
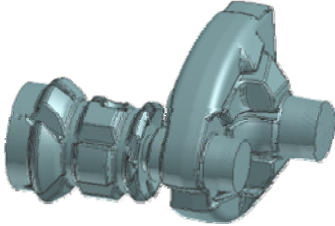
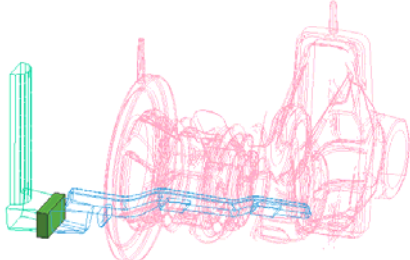
Počet částí	6
Počet uzlů	596979
Počet elementů	3175511
Rozměry modelu [mm]	538x738x731



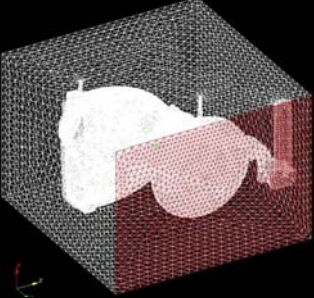
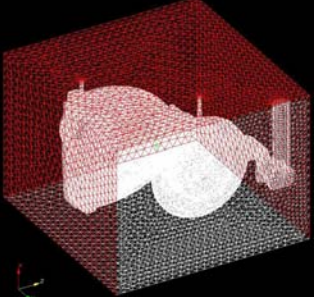
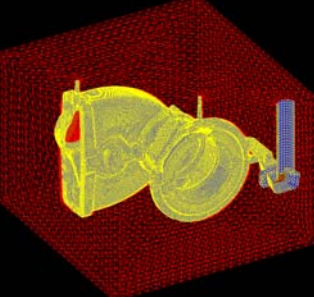
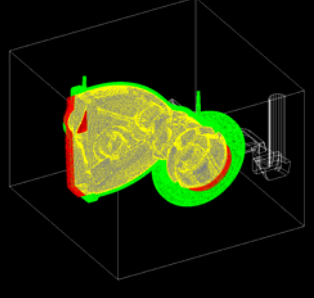
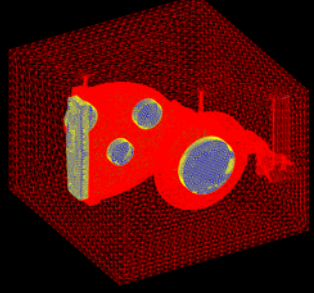
Obr. 7.4 Ukázka povrchové a objemové sítě

7.2.2 Počáteční a okrajové podmínky

Tab. 7.2 Počáteční podmínky

Model	Obrázek	Materiál	Teplota [°C]
Odlitek		Vermikulární litina	1350 (licí teplota)
Forma		Bentonitová směs	30
Jádra		Směs Coldbox	30
Filtr		Sedex 50x100x22	1350

Tab. 7.3 Okrajové podmínky

Typ	Obrázek
Symetrie	
Heat – ochlazování vzduchem	
H.T.Coeff. – koeficient přestupu tepla Odlitek – Forma $300 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	
H.T.Coeff. – koeficient přestupu tepla Odlitek – Jádro $500 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	
H.T.Coeff. – koeficient přestupu tepla Jádro – Forma $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	

7.2.3 Parametry simulace pro výpočet mechanických vlastností

Tyto parametry jsou voleny stejné, jako u předchozích simulací přilíých vzorků.

7.3 Zpracování naměřených dat

Data meze pevnosti a nodularity byly přiřazeny do tříd předpokládaného chemického složení podle příslušnosti k dané tavbě a hodnotám zjištěných ze simulace přilíých vzorků (kap. 6).

Mez pevnosti: Hodnoty meze pevnosti jsou k dispozici pouze z odběrného místa D, pro které bylo provedeno rozřídění dle předpokládaného chemického složení a porovnání s výsledky simulace.

Nodularita: Hodnoty byl říděny dle předpokládaného chemického složení podobně jako tomu je u meze pevnosti. Dále bylo provedeno řídění podle odběrných míst.

Statistické hodnocení: Podobě, jako tomu bylo u přilíých vzorků i zde bylo provedeno statistické hodnocení dat souborů, které obsahují dvě a více hodnot. Bylo provedeno:

- vyloučení odlehlých hodnot
- test normálního rozdělení
- určení střední hodnoty a směrodatné odchylky

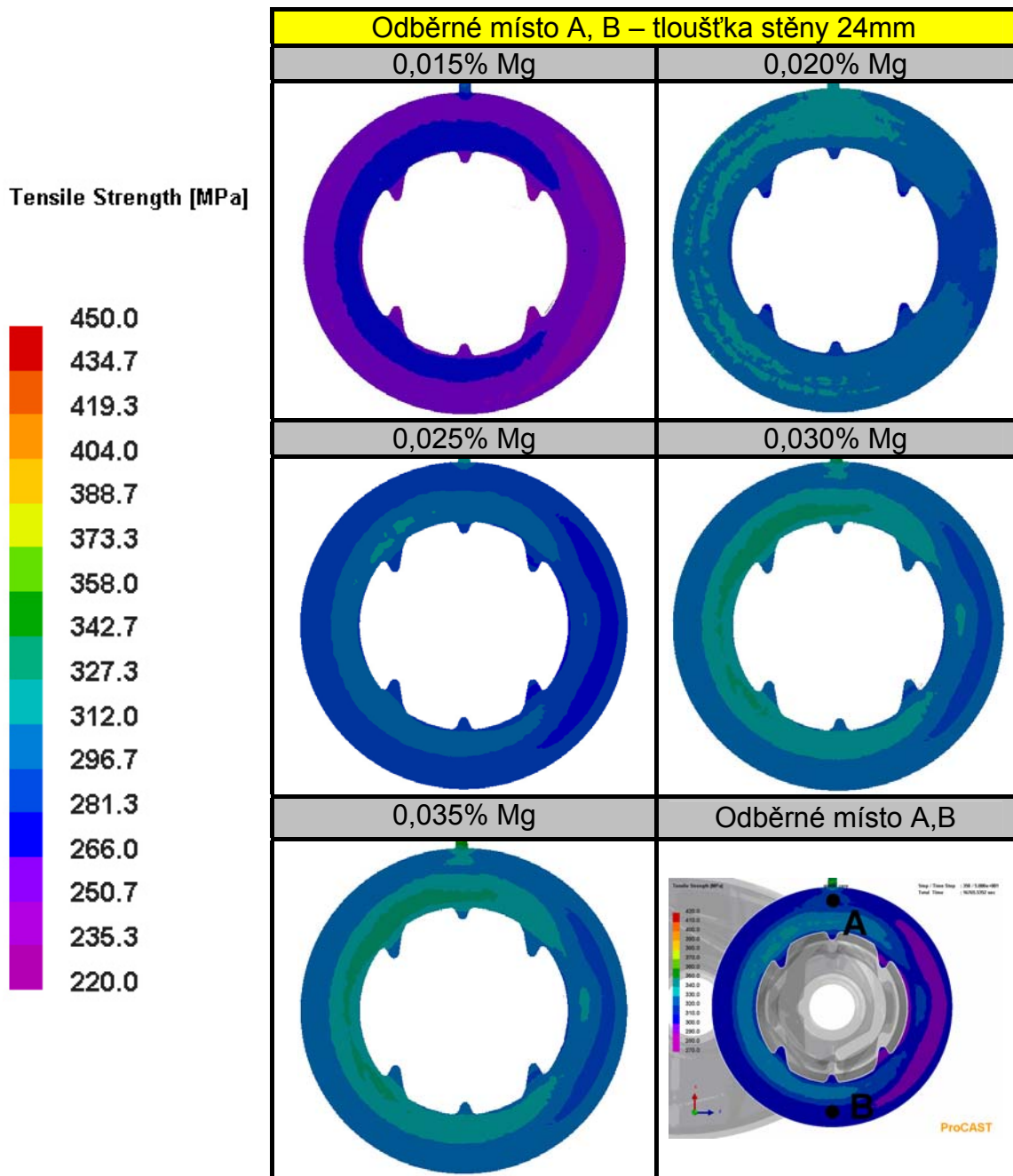
7.4 Výsledky simulace

Výsledky simulace jsou uvedeny pro mez pevnosti a nodularitu. Dále jsou uvedeny hodnoty z každého odběrného místa v závislosti na chemickém složení. Pro každý odběrný bod jsou v tabulce uvedeny naměřené hodnoty. Zelenou barvou jsou označeny hodnoty, jejichž soubory mají normální rozdělení. U ostatních souborů nebylo pro bližší vyhodnocení k dispozici dostatečné množství dat. Střední hodnota u výsledků simulace byla vypočtena z maximální a minimální hodnoty zjištěné vizuálně.

7.4.1 Mez pevnosti

Tab. 7.4 Hodnoty Rm – odběrný bod A

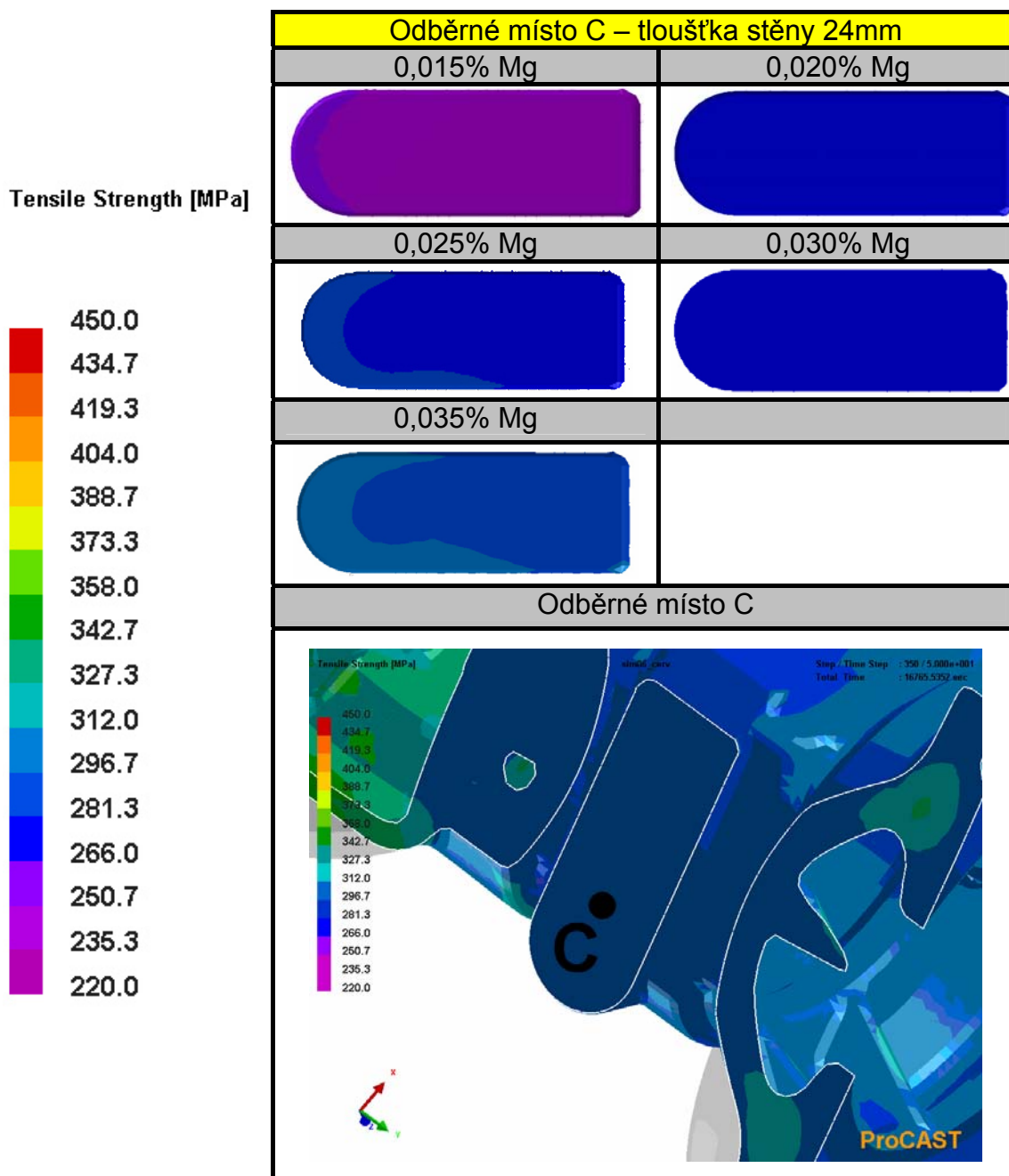
Odběrný bod	Odlitek		Simulace	
	Střední hodnota [MPa]	Sm. odchylka [MPa]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [MPa]
A	–	–	0,015	258
	–	–	0,020	304
	–	–	0,025	289
	–	–	0,030	320
	–	–	0,035	320



Obr. 7.5 Vyhodnocení meze pevnosti – místo A,B

Tab. 7.5 Hodnoty Rm – odběrný bod B

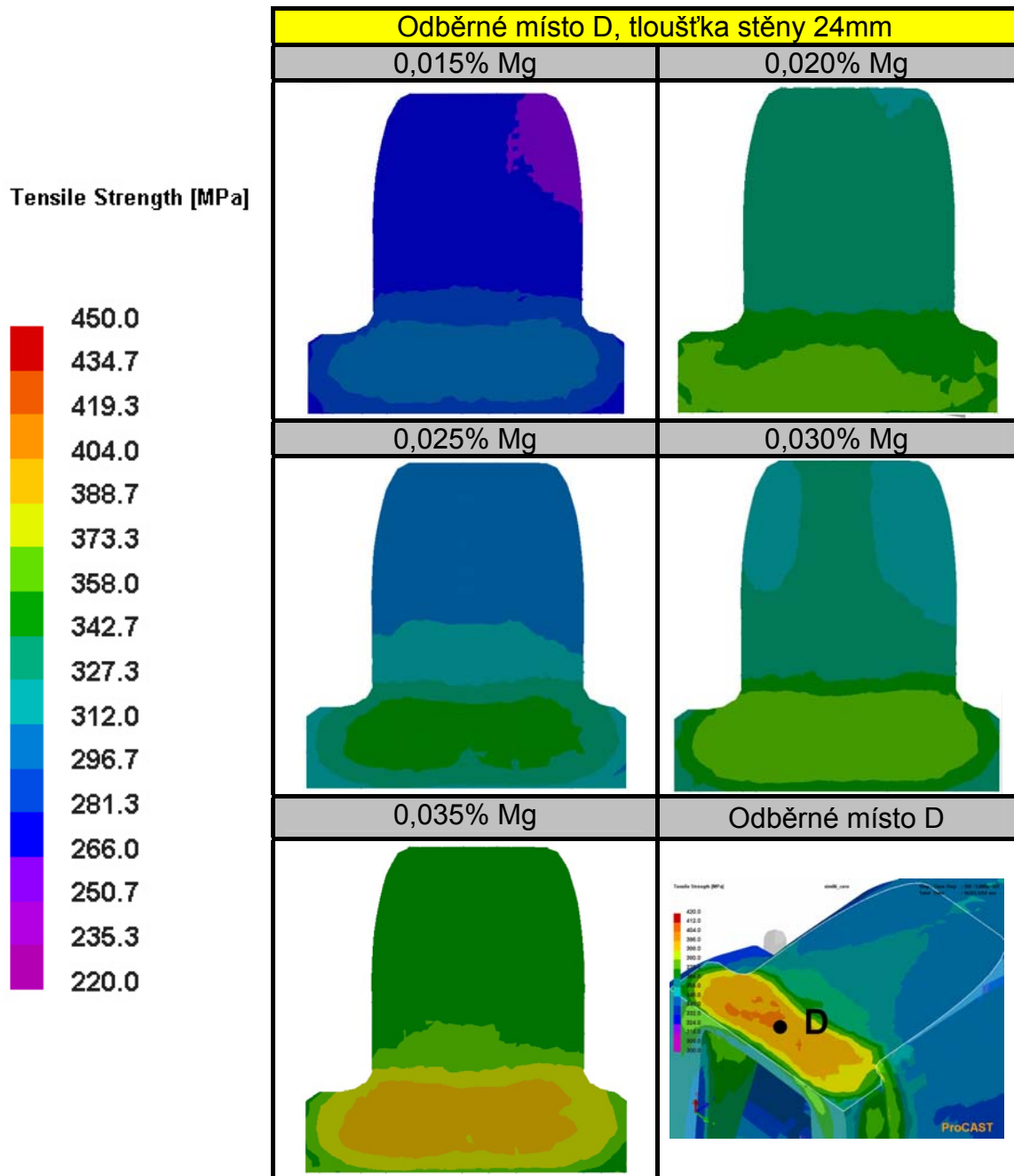
Odběrný bod	Odlitek		Simulace	
	Střední hodnota [MPa]	Sm. odchylka [MPa]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [MPa]
B	–	–	0,015	258
	–	–	0,020	289
	–	–	0,025	289
	–	–	0,030	289
	–	–	0,035	304



Obr. 7.6 Vyhodnocení meze pevnosti – místo C

Tab. 7.6 Hodnoty Rm – odběrný bod C

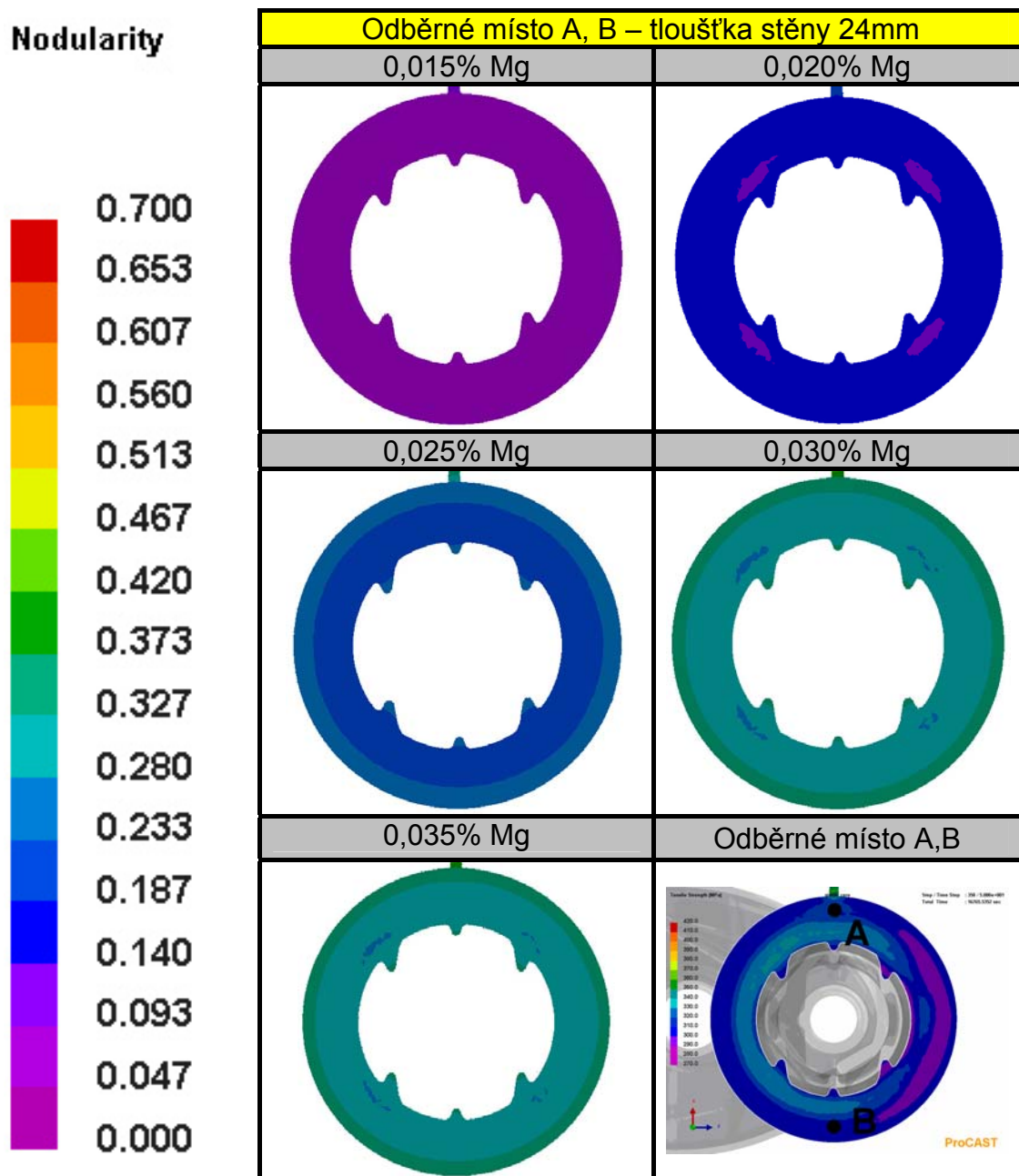
		Odlitek		Simulace	
Odběrný bod		Střední hodnota [MPa]	Sm. odchylka [MPa]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [MPa]
		C	–	–	–
–	–		–	0,020	274
–	–		–	0,025	274
–	–		–	0,030	274
–	–		–	0,035	289



Tab. 7.7 Hodnoty Rm – odběrný bod D

Odběrný bod	Odlitek		Simulace	
	Střední hodnota [MPa]	Sm. odchylka [MPa]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [MPa]
D	136	–	0,015	289
	360	–	0,020	366
			0,025	351
	396	6	0,030	366
			0,035	397

7.4.2 Nodularita



Obr. 7.8 Vyhodnocení nodularity – místo A,B

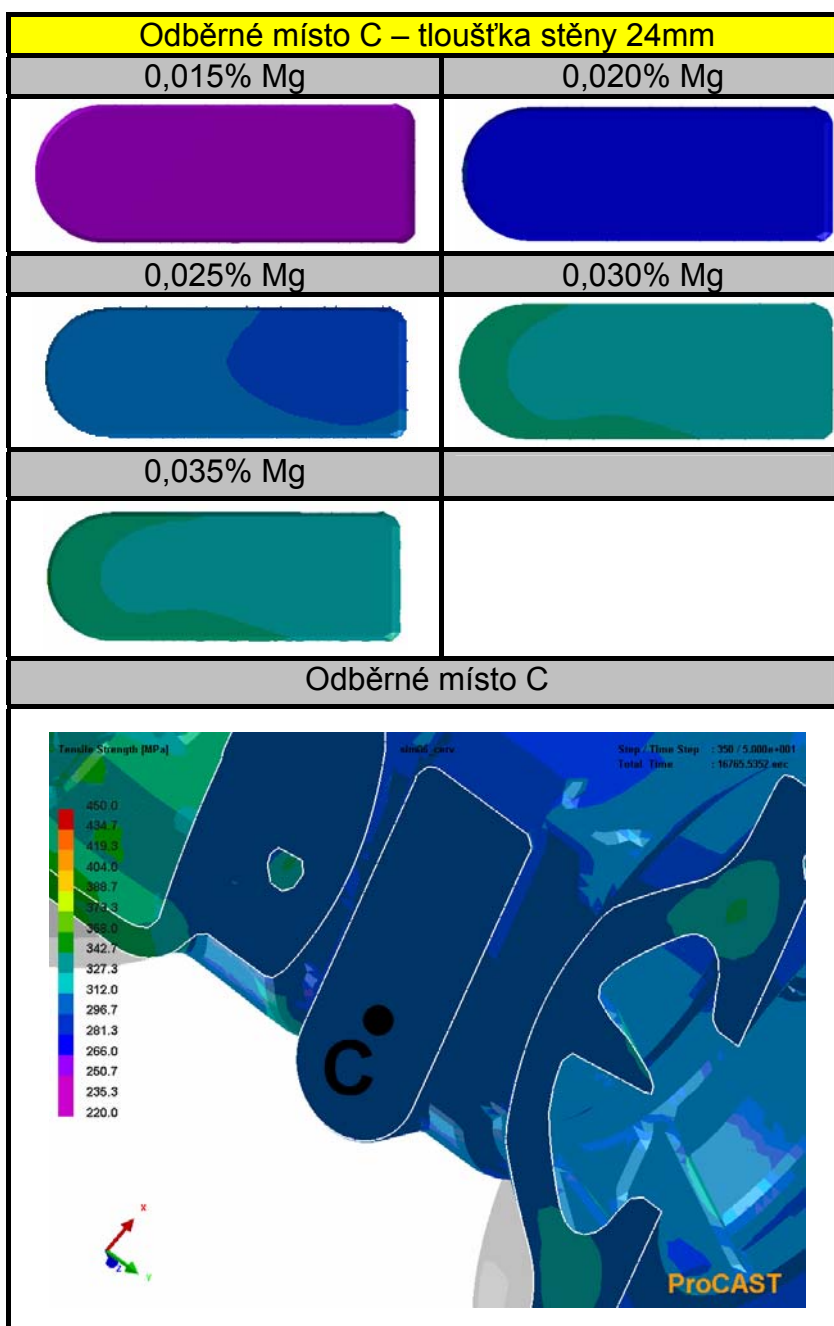
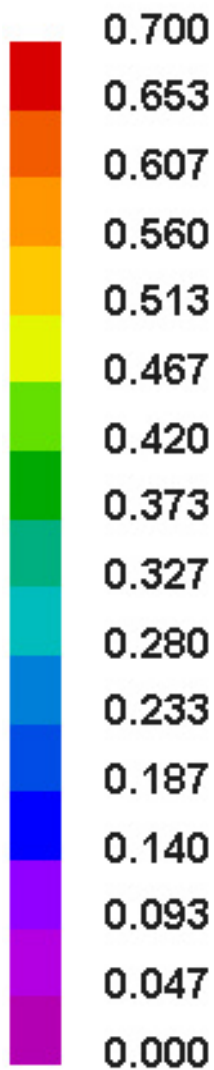
Tab. 7.8 Hodnoty nodularity – odběrný bod A

Odběrný bod	Odlitek		Simulace	
	Střední hodnota [%]	Sm. odchylka [%]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [%]
A	–	–	0,015	2
	–	–	0,020	16
	–	–	0,025	19
	20	8	0,030	35
	–	–	0,035	35

Tab. 7.9 Hodnoty nodularity – odběrný bod B

Odběrný bod	Odlitek		Simulace	
	Střední hodnota [%]	Sm. odchylka [%]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [%]
B	–	–	0,015	2
	–	–	0,020	16
			0,025	19
			0,030	35
	22	10	0,035	35

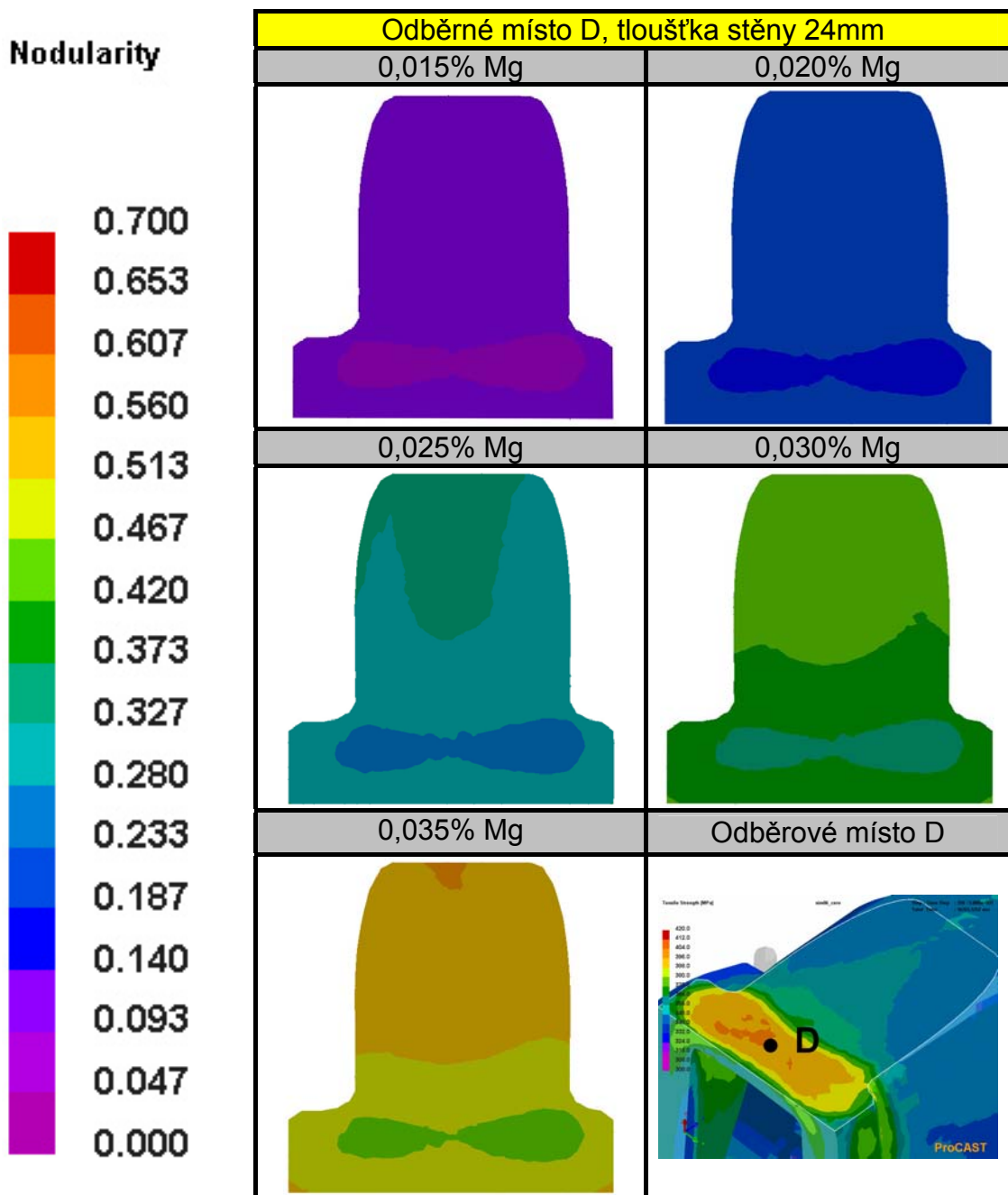
Nodularity



Obr. 7.9 Vyhodnocení nodularity – místo C

Tab. 7.10 Hodnoty nodularity – odběrný bod C

Odběrný bod	Odlitek		Simulace	
	Střední hodnota [%]	Sm. odchylka [%]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [%]
C	–	–	0,015	3
	–	–	0,020	16
			0,025	21
			0,030	30
	13	9	0,035	30



Obr. 7.10 Vyhodnocení nodularity – místo D

Tab. 7.11 Hodnoty nodularity – odběrný bod D

Odběrný bod	Odlitek		Simulace	
	Střední hodnota [%]	Sm. odchylka [%]	Předpokládané chemické složení [%]	Střední hodnota [%]
D	–	–	0,015	7
	–	–	0,020	17
	–	–	0,025	21
	–	–	0,030	35
	–	–	0,035	44

7.5 Vyhodnocení výsledků

Do celkového vyhodnocení porovnání simulace a měření z odlitku se promítá skutečnost, že měřených dat není dostatečné množství.

7.5.1 Mez pevnosti

Hodnoty meze pevnosti zjištěné simulací u přilítých vzorků a u odlitků se pro stejnou tloušťku stěny a stejné chemické složení shodují. Jelikož nebylo k dispozici dostatečné množství naměřených dat ze všech odběrných míst, nebylo provedeno statistické hodnocení.

U odběrného místa D dochází ke shodě hodnot v rozsahu množství zbytkového hořčíku 0,020 až 0,035%. Při menším množství zbytkového hořčíku jsou u vzorků uvedeny výrazně nižší hodnoty, což může být způsobeno nehomogenitou, nebo odezněním modifikačního účinku. Při známém chemickém složení je tedy možné provést predikci mechanických vlastností na základě simulace. Pro přesnější ověření je však doporučeno porovnání simulace s větším množstvím naměřených dat.

7.5.2 Nodularita

Jako je tomu u meze pevnosti, tak i u nodularity dochází ke shodě hodnot pro stejnou tloušťku stěny a chemické složení u simulace odlitku a přilítých vzorků. Kvůli nízkému počtu hodnot nejsou data nijak statisticky zpracována. Hodnoty nodularity naměřené přímo v odlitku mají však značný rozptyl, proto je nutno na tuto skutečnost brát ohled při vyhodnocování. Ve všech případech jsou hodnoty nodularity z reálných odlitků menší, než v simulacích.

Simulací zjištěné hodnoty lze užít pouze pro orientační predikci výsledné nodularity. Pro přesnější závěry je nutné zpracovat více dat. Avšak dá se předpokládat, že z důvodu dobré shody u přilítých vzorků (a díky faktu, že výpočet mechanických vlastností je při simulaci prováděn na základě hodnot nodularity), bude dosaženo dobré shody simulace a reálných zkoušek.

8 ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla vypracována rešerše týkající se litiny s vermikulárním grafitem. Byla popsána charakteristika, vlastnosti, způsob výroby a možnosti užití při konstrukci odlitků. Velký důraz byl přitom kladen na vlastnosti a možnosti užití tohoto druhu litiny. Vermikulární litina je pevnější, než litina s lupínkovým grafitem a oproti litině s kuličkovým grafitem vykazuje lepší slévárenské vlastnosti a navíc má řadu dobrých fyzikálních vlastností, jako je např. odolnost proti opalu (oxidace za vysokých teplot), tepelná vodivost a útlum. Velká pozornost je tomuto materiálu věnována v oblasti vývoje spalovacích motorů. Ačkoliv u benzinových motorů vládnou jako slitiny pro bloky motorů siluminy, u motorů dieselových je tomu jinak. Při zvyšování výkonu je třeba užít materiálu o větších pevnostech – právě zde je užívána vermikulární litina.

V části druhé byl rozebrán matematický model simulačního softwaru ProCAST a to jak pro verzi 2010, tak 2011. Byly popsány změny a zpřesnění výpočtového modelu pro simulaci mechanických vlastností grafitických litin. Bylo předvedeno, že výsledné hodnoty mechanických vlastností (jako je mez pevnosti a tvrdost) ale i strukturních vlastností závisí na množství zbytkového hořčíku, velikosti zrna primárního grafitu a také na podílu jednotlivých strukturních složek. Při výpočtu mechanických vlastností je proto nejprve predikována struktura a poté je teprve přistoupeno k výpočtu mechanických vlastností.

V třetí části bylo provedeno porovnání výsledků simulace ve staré a nové verzi a porovnání s hodnotami z reálného odlitku, který je vyráběn ve slévárně Heunisch, s.r.o. Výsledky přímo učebnicově ukázaly, jak moc závisí mechanické vlastnosti na množství zbytkového hořčíku. Zatímco u verze 2010 není sledována žádná změna vlastností až do té doby, kde se objevuje ve struktuře převážně kuličkový grafit, u verze 2011 je jasně vidět nárůst mechanických vlastností s rostoucím množstvím zbytkového hořčíku.

Porovnání s reálným odlitkem bylo provedeno pro přilité vzorky a pro odlitek, neboť právě taková byla použita data z měření. Pro přilité vzorky byla vypracována celá geometrie a simulace, pro odlitek bylo užito modelu, který byl simulován v předchozí verzi. V obou případech byly výsledky vyhodnocovány na základě předpokládaného chemického složení. U přilítých vzorků dochází k lepší shodě výsledků simulace s realitou, než tomu je u vlastního odlitku. To může být způsobeno tím, odlitek má složitější tvar a tím dochází k větším odchylkám od ideálního stavu, než tomu je u přilítých vzorků. Výsledkem tedy je, že numerickou simulaci mechanických vlastností lze užít pro predikci vlastností reálného odlitku, avšak vzhledem k nestabilitě procesu výroby vermikulární litiny je třeba provést vyhodnocení na vzorcích a odlitcích pro dané podmínky, které při výrobě panují a také je nutné co nejpřesněji znát chemické složení vermikulární litiny, především pak obsah zbytkového hořčíku.

Konstruktor tedy již není odkázán pouze na vzorky, které se od výsledků reálného odlitku mohou výrazně lišit, ale dokáže pomocí simulace mechanických vlastností poměrně přesně předpovědět, jakých vlastností bude dosaženo u reálného odlitku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ROUČKA, J., *Metalurgie litin*, 1. Vydání, Brno, PC-DIR Real, s.r.o., 1998, 166 s., ISBN 80-214-1263-1.
2. PODRÁBSKÝ, T., POSPÍŠILOVÁ, S., *Struktura a vlastnosti grafitických litin* [online], 16. 11. 2006, dostupné na WWW (15.5.2012): <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=1>.
3. DAWSON, S., Compacted Graphite Iron – A Material Solution for Modern Diesel Engine Cylinder Blocks and Heads, [online], In *68th WFC – World Foundry Congress*, 7th – 10th February, 2008, pp. 93–99, dostupné na WWW (15.5.2012): http://www.foundryinfo-india.org/tech_section/pdf/19_OP.pdf
4. PTÁČEK, L a kol., *Nauka o materiálu II*, 1. Vydání, CERM s.r.o., Brno, 2002, 392 s., ISBN 80-7204-130-4.
5. IMASOGIE, B., I., Microstructural Features and Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron Treated With Calcium-Magnesium Based Masteralloy, [online], *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2003, Vol. 12(3), June, p. 239–243, dostupné na WWW (15.5.2012): <http://www.springerlink.com/content/vg5115713206533t/fulltext.pdf>
6. EL SABAGH, W., M., M., *The Effect of Compacted Graphite Iron Microstructure on Fracture and Machining*, [online], 2011, Open Dissertation and Theses, dostupné na WWW (15.5.2012): <http://digitalcommons.mcmaster.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=7247&context=opendissertations>
7. BECHNÝ, J., STRÁNSKÝ, K., VŘEŠŤÁL, J., Růstový model kompaktního grafitu a jeho korelace k reálným systémům grafitických litin, *Slévárství*, 1985, čís. 5, s.190–197.
8. ECOB, C., M., HARTUNG, C., *An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons*, Elkem ASA, Norway, Dostupné na WWW (15.5.2012): www.elkem.no/dav/db7e4b4b73.pdf
9. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., Výroba litiny s červíkovitým grafitem, *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské-Technické univerzity Ostrava*, 2009, no. 1, ročník LII, článek č. XXX.
10. GUESSER, W., L., MASIERO, I., MELLERAS, E., CABEZAS, C., *Fatigue strength of gray iron and compacted graphite iron used for engine cylinder blocks*, 2004, dostupné na WWW(15.5.2012): <http://apps10.tupy.com.br/ingles/tecnologia/biblioteca.php>
11. RODTER, H., Litina s kompaktním grafitem – nový materiál s uznávanou jakostí, *Slévárství*, září 2005, čís. 9, roč. 53, s. 395–397.
12. GUESSER, W., L., MASIERO, I., MELLERAS, E., CABEZAS, C., *Thermal conductivity of gray iron and compacted graphite iron used for cylinder heads*, dostupné na WWW (15.5.2012): <http://apps10.tupy.com.br/ingles/tecnologia/biblioteca.php>

13. GUESSER, W., SCHROEDER, T., DAWSON, S., *Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components*, 2001, American Foundry Society, Dostupné na WWW (15.5.2012): <http://apps10.tupy.com.br/ingles/tecnologia/biblioteca.php>
14. OTÁHAL, V., *Litina s kompaktním – vermikulárním (červíkovitým) grafitem*, Dostupné na WWW (15.5.2012): http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Kompakt_vytah.pdf
15. Dostupné na WWW (15.5.2012): <http://www.good-win-racing.com/Mazda-Performance-Part/61-0401.html>
16. Dostupné na WWW (15.5.2012): <http://www.heunisch-guss.com/cz/produkty/vermikularni-litina.html>
17. Dostupné na WWW (15.5.2012): <http://www.precisionenginetech.com/tech-explained/2009/07/02/compacted-graphite-engine-blocks/>
18. HERMAN, A., et al., *Počítačové simulace ve slévárenství*, 1. Vydání, Praha, Vydavatelství ČVUT, 2000, 62 s., 62 obrázků, 16 příloh, ISBN 80-01-02220- X.
19. LUDVIK, O., Presentation: *Microstructure 2011.0*, CAST Technical Workshop, September 2011, esi – group.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
A ₅	[%]	Tažnost
HB	[HB]	Tvrдость podle Brinnella
R _{p0,2}	[MPa]	Mez kluzu
R _D	[MPa]	Pevnost v tlaku
σ _C	[MPa]	Mez únavy
K _{Ic}	[MPa]	Lomová houževnatost
E	[GPa]	Modul pružnosti
λ	[W/m.K]	Tepelná vodivost
t	[°C]	Teplota
ε	[%]	Poměrné prodloužení
m	[kg]	Hmotnost
F	[%]	Podíl feritu
P	[%]	Podíl perlitu
%Mg	[%]	Obsah zbytkového hořčíku

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Vermikulární grafit – elektronová mikroskopie [5].....	- 10 -
Obr. 2.2 Vermikulární grafit – metalografický výbrus [6].....	- 10 -
Obr. 2.3 Feritická struktura u vermikulární litiny [2]	- 11 -
Obr. 2.4 Feriticko – perlitická struktura u vermikulární litiny [2]	- 11 -
Obr. 2.5 Perlitická struktura u vermikulární litiny [2]	- 11 -
Obr. 2.6 Vliv rychlosti ochlazování na výslednou strukturu matrice [1].....	- 12 -
Obr. 2.7 Mechanické vlastnosti grafitických litin [2].....	- 14 -
Obr. 2.8 Vliv nodularity na mechanické vlastnosti LVG [8]	- 15 -
Obr. 3.1 Vliv množství Ti na obrobiteľnosť [13].....	- 17 -
Obr. 3.2 Vliv užitého modifikátoru na modifikační rozsah Mg [1].....	- 17 -
Obr. 4.1 Vliv zatížení litiny na modul pružnosti [14].....	- 19 -
Obr. 4.2 Tepelná vodivost grafitických litin v závislosti na teplotě [12]	- 20 -
Obr. 4.3 Relativní útlum u grafitických litin [8]	- 20 -
Obr. 4.4 Opal litiny při teplotě 600 °C v průběhu 34 týdnů [14]	- 21 -
Obr. 4.5 Vliv nodularity na tepelnou vodivost [8]	- 21 -
Obr. 4.6 Maximální tlak spalování [10]	- 22 -
Obr. 4.7 Materiály používané pro bloky motorů[10].....	- 22 -
Obr. 4.8 Brzdový kotouč [15].....	- 23 -
Obr. 4.9 Skříň kompresoru [16]	- 23 -
Obr. 4.10 Blok motoru [17]	- 23 -
Obr. 4.11 Hlava válce lodního motoru (2000kg) [14].....	- 24 -
Obr. 4.12 Blok motoru pro lokomotivy a nákladní vozy [14]	- 24 -
Obr. 4.13 Motor Rolls Royce (cca 1000kg) [14]	- 24 -
Obr. 4.14 Ložisková konzole (2kg) [14].....	- 24 -
Obr. 4.15 Brzdová konzole (9kg) [14].....	- 24 -
Obr. 4.16 Montážní konzole pro přídatné řízení traktoru (5,7kg) [14].....	- 24 -
Obr. 4.17 Excentrické ozubené kolo (450kg) [14]	- 24 -
Obr. 4.18 Brzdové disky rychlovlaku [14].....	- 24 -
Obr. 4.19 Rotor Wankelova motoru [14].....	- 24 -
Obr. 4.20 Skříň turbodmychadla (1100kg) [14]	- 25 -
Obr. 4.21 Plnicí hrdlo turbodmychadla [14].....	- 25 -
Obr. 4.22 Skříň turbodmychadla (180kg) [14]	- 25 -
Obr. 5.1 Ukázka výsledků podílu feritu ve struktuře v obou verzích [19].....	- 27 -

Obr. 5.2 Hodnoty meze kluzu v závislosti na množství hořčíku [19].....	- 28 -
Obr. 6.1 Odlité vzorky	- 31 -
Obr. 6.2 Model přilítých vzorků.....	- 32 -
Obr. 6.3 Ukázka povrchové a objemové sítě	- 32 -
Obr. 6.4 Modul Micro.....	- 33 -
Obr. 6.5 Vyhodnocení meze pevnosti tyčí pro zkoušku tahem	- 35 -
Obr. 6.6 Vyhodnocení meze pevnosti Y bloku – verze 2010.....	- 36 -
Obr. 6.7 Vyhodnocení meze pevnosti Y bloku – verze 2011.....	- 37 -
Obr. 6.8 Vyhodnocení meze pevnosti schodů 20 a 24mm	- 38 -
Obr. 6.9 Vyhodnocení podílu perlitu – schody.....	- 40 -
Obr. 6.10 Vyhodnocení podílu perlitu – schody (pokračování).....	- 41 -
Obr. 6.11 Vyhodnocení nodularity – schody	- 42 -
Obr. 7.1 Geometrie odlitku	- 46 -
Obr. 7.2 Místa odběru vzorků z odlitku (zleva: A, C, D)	- 46 -
Obr. 7.3 Odběrová místa – simulace.....	- 47 -
Obr. 7.4 Ukázka povrchové a objemové sítě	- 48 -
Obr. 7.5 Vyhodnocení meze pevnosti – místo A,B.....	- 51 -
Obr. 7.6 Vyhodnocení meze pevnosti – místo C	- 52 -
Obr. 7.7 Vyhodnocení meze pevnosti – místo D.....	- 53 -
Obr. 7.8 Vyhodnocení nodularity – místo A,B	- 54 -
Obr. 7.9 Vyhodnocení nodularity – místo C	- 55 -
Obr. 7.10 Vyhodnocení nodularity – místo D	- 56 -

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Složení vermikulární litiny (hodnoty v %) [1]	- 14 -
Tab. 2.2 Složení vermikulární litiny (hodnoty v %) [5]	- 14 -
Tab. 2.3 Mechanické vlastnosti LVG [9].....	- 15 -
Tab. 4.1 Vlastnosti grafitických litin v závislosti na tvaru grafitu [9]	- 19 -
Tab. 5.1 Mechanické vlastnosti feritu vzniklého z austenitu [19]	- 29 -
Tab. 5.2 Mechanické vlastnosti feritu vzniklého z eutektika [19]	- 29 -
Tab. 5.3 Mechanické vlastnosti perlitu vzniklého z austenitu [19]	- 29 -
Tab. 5.4 Mechanické vlastnosti perlitu vzniklého z eutektika [19]	- 29 -
Tab. 5.5 Mechanické vlastnosti metastabilní fáze [19]	- 29 -
Tab. 5.6 Mechanické vlastnosti austenitu [19].....	- 29 -
Tab. 5.7 Mechanické vlastnosti grafitu [19]	- 29 -
Tab. 6.1 Parametry výpočtové sítě.....	- 32 -
Tab. 6.2 Počáteční podmínky.....	- 32 -
Tab. 6.3 Okrajové podmínky	- 33 -
Tab. 6.4 Hodnoty Rm – Tyč pro zkoušku tahem [MPa].....	- 39 -
Tab. 6.5 Hodnoty Rm – Schody 20, 24mm [MPa]	- 39 -
Tab. 6.6 Hodnoty Rm – Y Blok [MPa]	- 39 -
Tab. 6.7 Hodnoty strukturních vlastností – Schody [%].....	- 43 -
Tab. 6.8 Testování hypotéz o rovnosti středních hodnot.....	- 44 -
Tab. 7.1 Parametry výpočtové sítě.....	- 47 -
Tab. 7.2 Počáteční podmínky.....	- 48 -
Tab. 7.3 Okrajové podmínky	- 49 -
Tab. 7.4 Hodnoty Rm – odběrný bod A.....	- 50 -
Tab. 7.5 Hodnoty Rm – odběrný bod B.....	- 51 -
Tab. 7.6 Hodnoty Rm – odběrný bod C.....	- 52 -
Tab. 7.7 Hodnoty Rm – odběrný bod D.....	- 53 -
Tab. 7.8 Hodnoty nodularity – odběrný bod A.....	- 54 -
Tab. 7.9 Hodnoty nodularity – odběrný bod B.....	- 55 -
Tab. 7.10 Hodnoty nodularity – odběrný bod C.....	- 56 -
Tab. 7.11 Hodnoty nodularity – odběrný bod D.....	- 57 -

SEZNAM VZORCŮ

(2.1) Uhlíkový ekvivalent	- 13 -
(5.1) Mechanické vlastnosti I	- 28 -
(5.2) Mechanické vlastnosti II	- 30 -
(6.1) Podíl feritu	- 40 -