

## Numerická analýza napät'ovo-deformačných stavov mikroštruktúry pre liatinu s vermikulárnym tvarom grafitu

### Numerical Analysis of Stress-strain States of Microstructure in the Cast Iron with Vermicular Shape of Graphite

Ing. Radka Bezdedová, PhD.; Ing. Petra Kováčiková, PhD.; doc. Ing. Ján Vavro, PhD.; prof. Ing. Ján Vavro, PhD.

Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, Fakulta priemyselných technológií v Púchove, I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov, Slovenská republika

*Výpočtové modelovanie pomáha v súčasnosti riešiť najkomplikovanejšie inžinierske úlohy. Moderné výpočtové metódy sú závislé od tvorby virtuálneho modelu a následnej simulácie. Práca sa zaoberá analýzou napät'ových stavov mikroštruktúry pre liatinu s vermikulárnym typom grafitu. Pojednáva o jej mechanických vlastnostiach a štruktúre, ktoré je nevyhnutné poznať ako vstupné parametre pre výpočtové modelovanie a numerickú analýzu. Pre prípravu geometrického modelu bola využitá kvantitatívna metalografia, ktorá nám umožňuje zhodnotiť štruktúru materiálu na základe obrazovej analýzy. Výpočtový model štruktúry bol vytvorený v 2-D priestore pomocou trojuholníkových trojzvlých elementov. Na základe reálnej štruktúry liatinu s vermikulárnym tvarom grafitu bol vytvorený model, z ktorého bola vykonaná numerická analýza napät'ovo-deformačných stavov metódou konečných prvkov v softvérovom prostredí ADINA. Táto práca modelovania mikroštruktúry materiálov a následnej numerickej analýzy otvára nové oblasti a pohľady pre využitie výpočtových prostriedkov pre analýzu štruktúry v rôznych napät'ových stavoch a pre rôzne tlmiacie, prípadne frekvenčné vlastnosti materiálu.*

**KLúčové slová:** liatina; numerická analýza; vermikulárny tvar grafitu; výpočtové modelovanie; model štruktúry

*Nowadays, computing modelling is one of the efficient methods for solving the most complicated engineering tasks. Modern calculation methods depend on designing a virtual model and subsequent simulation. The paper is concerned with the analysis of tension conditions of microstructure in the cast iron with the vermicular type of graphite. It deals with its structure and mechanical properties, which must be known as input parameters for computing modelling and numerical analysis. Quantitative metallography was used for the preparation of a geometrical model, because it enabled us to evaluate the structure of the material on the basis of image analysis. The computing structure model has been created in the 2-D area by triangle trefoil knot elements. The size of the elements has been set on the basis of sensitivity analysis to  $0.5\ \mu\text{m}$ , while the analysed area size was  $0.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ . On the basis of the real structure of the cast iron with the vermicular type of graphite, a model was created and subsequently the numerical analysis of tension deformation conditions was performed by finite element method in the ADINA software environment. This calculation program helps us to solve very difficult tasks and its advantage is that the generated model can reflect the actual geometry of the object quite well. For the calculation and following statistic evaluation needs, it is necessary to generate a greater number of geometrical models in the future. This paper is based on microstructure modelling of materials. The subsequent numerical analysis of this cast iron opens new areas and outlooks for usage of computing instruments related to analysing the state of the material structure in the area of tension, absorption or frequency qualities of the material. Stress concentration is increased with irregularities of graphite particle shapes. From the result of this experiment, it can be concluded that the graphite particles have a negative impact due to the occurrence of stress concentration.*

**Key words:** cast iron; numerical analysis; vermicular type of graphite; computing modelling; model structure

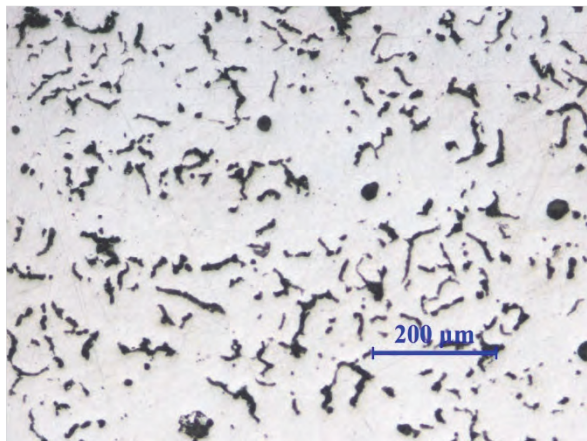
Hlavným cieľom bola analýza napät'ovo-deformačných stavov grafitickej liatinu s vermikulárnym tvarom grafitu. Je zameraná na obrazovú analýzu a vstupné parametre získané z obrazovej analýzy slúžili pre tvorbu geometrického modelu. Práca je zameraná na numerickú analýzu napät'ovo-deformačných stavov štruktúr grafitickej liatinu s červíkovitým tvarom grafitu v programe, ktorý pracuje na báze metódy konečných prvkov

ADINA. Problematika bola riešená ako statická úloha lineárneho charakteru.

#### Materiálové charakteristiky

Častice grafitu vo vermikulárnej liatine sú podlhovasté, nesmú mať ostré hrany a sú náhodne orientované.

Na obr. 1 môžeme pozorovať pri dvojrozmernom pohľade jednotlivé častice červíkovitého tvaru grafitu a zároveň vidíme, že je časť grafitu vylúčená vo forme guľôčok. Množstvo globulárneho grafitu sa označuje ako nodularita [1, 2].



Obr. 1 Mikroštruktúra vzorky liatiny s vermikulárnym tvarom grafitu pri 10% nodularite, zv. 100×

Fig. 1 Microstructure of cast iron with vermicular type of graphite, zoomed 100×

Špecifický tvar vermikulárneho grafitu, ktorý má dobrú adhéziu k vlastnej kovovej matici, zaručuje zvýšenie mechanických vlastností (tab. 1) [1, 2].

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vermikulárnej liatiny

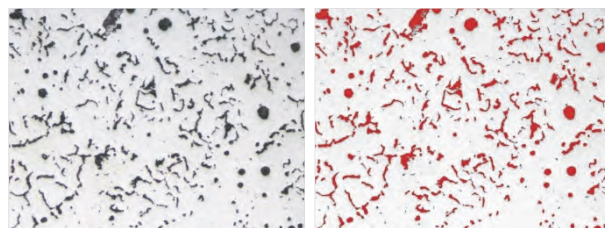
Tab. 1 Mechanical properties of cast iron with vermicular type of graphite

| Vlastnosti                    | Jednotky            | Grafit      |
|-------------------------------|---------------------|-------------|
| Pevnosť v ťahu $R_m$          | MPa                 | 300 – 550   |
| Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ | MPa                 | 250 – 380   |
| Pevnosť v tlaku $R_{mt}$      | MPa                 | 600 – 1 200 |
| Ťažnosť A                     | %                   | 2 – 8       |
| Tvrdosť HB                    | -                   | 130 – 280   |
| Medza únavy ťah-tlak          | MPa                 | 120 – 180   |
| Modul pružnosti E             | kN·mm <sup>-2</sup> | 130 – 160   |

### Kvantitatívna metalografia

Úlohou kvantitatívnej metalografie je modelovanie štruktúry, ktorú je možné získať na základe údajov získaných v rovine rezu v dvojrozmernom priestore. Pomocou obrazovej analýzy boli na naleptaných vzorkách vyhodnotené vstupné parametre, ako počet grafitu, veľkosť, jeho obsah a prostredníctvom tvarového faktora aj geometria grafitu. Výsledkom je konkrétne číslo charakteristické veľkou presnosťou. Zároveň bol na naleptaných vzorkách vyhodnotený obsah feritu. Mikroštruktúra naleptaných vzoriek bola nasnímaná z mikroskopu kamerou a obraz bol prenesený do počítača. Zo záznamu obrazu boli zadefinované častice grafitu – prahovanie. Z obrazu sa následne vylúčili inklúzie a po výbere štruktúrnych parametrov prebehlo hodnotenie. Hodnotenie bolo vykonané na niekoľkých náhodne vybraných miestach, z ktorých bol vytvorený aritmetický priemer. Výsledky sa exportovali do programu Excel a boli následne spracované a vyhodnotené. Podľa

merania je možné typické častice vermikulárneho grafitu charakterizovať tvarovým faktorom  $S_c <0,1; 0,5>$ . Hodnotenie grafitu pomocou obrazovej analýzy zobrazuje obr. 2 [3 – 5].



Obr. 2 Definovanie častíc grafitu farebným odlíšením, zv. 100×

Fig. 2 Definition of the graphite particles – colour modulation, zoomed 100×

### Geometrický model

Vstupné geometrie pre numerickú analýzu boli vytvorené, ako 2D modely v prostredí CAD. Bola vytvorená séria modelov štruktúry dutín predstavujúcich grafítické častice. Geometrické modely boli riešené ako plochy o rozmere 0,5 × 0,5 mm. Charakteristické geometrické parametre pre vermikulárny tvar grafitu, zadané pri modelovaní, boli zvolené na základe obrazovej analýzy v rozsahu tvarového faktoru  $<0,1; 0,5>$ . Snímky štruktúry v podobe bitmapových dát sa funkciou detekcie hrán vektorizovali. Detekcia hrán je názov pre sadu matematických metód, ktoré sú zamerané na identifikáciu bodov v digitálnom obraze. Princíp funguje na rozlišovaní zmeny jasu alebo farebných nespojitostí. JPEG formát snímku sa za pomoci programu Corel Draw (plugin PowerTrace) exportoval ako DXF formát (obr. 3). Plugin PowerTrace je interaktívny a umožňuje upravovať nastavenie prevodu a kontrolu výsledku. Táto premena rastrového vstupu na vektorový umožnila získať vektorovo definovanú štruktúru, ale aj jednotlivé tvary častíc. Štruktúry v DXF formáty boli spracované za pomoci CAD prostredia systému PTC Creo, ktorého výstup bol vo formáte IGES importovaný do MKP softwaru ADINA AUI. Do výpočtu neboli zaradené dutiny, ktoré sa nachádzali blízko hranice štruktúry alebo ju pretínali z dôvodu predchádzania nepresnostiam [3 – 5].



Obr. 3 Detail štruktúry vo formáte DXF

Fig. 3 Detail of the structure in DXF format

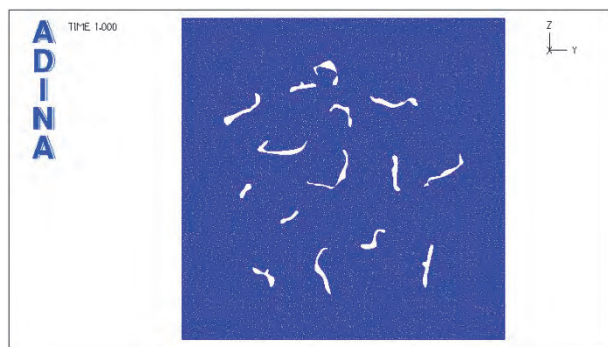
### Numerická analýza

Numerická analýza bola riešená ako statická úloha v module Adina Structures. Maticu považujeme za ho-

mogénnu štruktúru s lineárnou závislosťou deformácia-napätie. Boli zadefinované okrajové podmienky, odobraté stupne voľnosti. Veľkosť zaťaženia bola  $1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ . Pre analýzu bol zvolený lineárno-elastický model a zadefinované materiálové charakteristiky pre LČG. Grafické častice majú nízku pevnosť v ťahu a častú dekohéziu od matrice. Tieto vlastnosti ich umožňujú modelovať ako dutiny, pre ktoré nebola vytvorená konečnoprvková sieť (obr. 4) [6–9].

Z dôvodu potreby vysokej presnosti riešenia bola zvolená veľkosť elementu  $0,5 \mu\text{m}$  na základe citlivostnej analýzy (obr. 5).

Rozloženie napätí v oblasti častíc vermikulárneho tvaru je zobrazené na obr. 6.



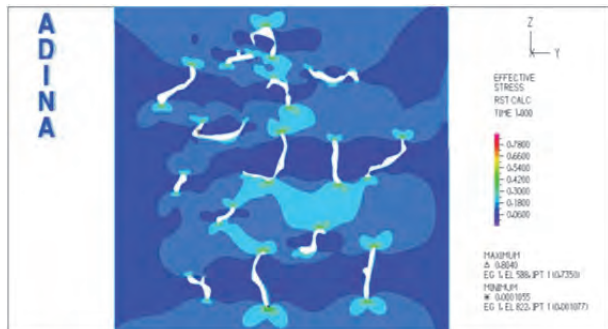
Obr. 4 Generovaná konečnoprvková sieť pre štruktúru s dutinami vermikulárneho tvaru

Fig. 4 Generated finite element mesh for structure with vermicular cavities



Obr. 5 Detail konečnoprvkovej siete pre štruktúru s dutinami vermikulárneho tvaru

Fig. 5 Detail of the finite-element mesh for structure with vermicular cavities



Obr. 6 Rozloženie napätia v oblasti okolia grafických častíc

Fig. 6 Distribution of stress around vermicular graphitic particles

## Záver a odporúčanie

V práci je riešená problematika analýzy napät'ovo-deformačných stavov grafitickej liatiny s vermikulárnym tvarom grafitu realizovaná metódou konečných prvkov v software ADINA. Dôležitým prvkom pri numerickej analýze bolo určenie vstupných parametrov. Prvým krokom bolo zistenie tvarových a rozmerových parametrov pre grafické častice v štruktúre pomocou obrazovej analýzy. Meranie sa uskutočnilo na 10 snímkach, na ktorých bolo pozorované spoločne 2 203 grafických častíc. V rámci analýz, ktoré boli na zjednodušených modeloch grafických štruktúr prevedené, bola najväčšia pozornosť venovaná na dosiahnutie napät'ových stavov liatiny s vermikulárnym grafitom. Na základe analýzy z výsledkov možno rezultovať negatívny vplyv vermikulárneho tvaru grafitu na koncentráciu napätia. Táto problematika sa stáva čoraz aktuálnejšou aj vďaka novým trendom v oblasti hodnotenia štruktúry. Úloha je riešená ako 2D problematika pre potvrdenie alebo komparáciu výsledkov navrhujeme riešiť úlohu ako 3D. Táto metóda sa môže stať základom k modernejšiemu prístupu pre určovanie vlastností grafických liatin na základe výpočtového modelovania mikroštruktúry [5].

## Pod'akovanie

Práca bola podporená grantmi VEGA 1/0358/14, KEGA 006TnUAD-4/2014, KEGA 005TnUAD-4/2016 a projektom „Centrum pre testovanie kvality a diagnostiku materiálov“, ITMS kód 26210120046 Operačného programu Výskum a vývoj.

## Literatúra

- [1] SKOČOVSKÝ, P., PODRÁBSKÝ, T. *Grafické liatiny*. Žilina: EDIS, 2005. ISBN 80-8070-390-6.
- [2] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*, 2 opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] VAŠKO, A., SKOČOVSKÝ, P. *Kvantitatívne hodnotenie štruktúry liatin*. EDIS, 2017. ISBN 978-80.8070-748-4.
- [4] VAŠKO, A. Využitie obrazovej analýzy pri hodnotení mikroštruktúry grafických liatin. In *Lokální mechanické vlastnosti*, Nečtiny, 2006.
- [5] BEZDEDOVÁ, R. Analýza napät'ovo-deformačných stavov grafitickej liatiny s vermikulárnym tvarom grafitu. (Dizertačná práca) Púchov: FPT TnUAD, 2016.
- [6] HANDRÍK, M., KOPAS, P., DEKÝŠ, V. Príspevok k modelovaniu a analýze napätosti konečných prvkov s ohľadom na náhodné rozloženie inklúzií v štruktúre. In: *Nekonvenčné technológie 2006*, Žilina, 2006.
- [7] VAVRO, J. *Numerická analýza napät'ových stavov štruktúr grafických liatin*. Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2013. ISBN 98-80-075-614-7.
- [8] VAVRO, J., HAJSKÁ, H., VAVRO, J. ml., VAVROVÁ, A. *Nové metódy a prístupy experimentálnej mechaniky pri identifikácii väd a porúch výrobkov*. Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2011. ISBN 978-83-7490-461-2.
- [9] RAPPAPAZ, M., BELLET, M., DEVILE, M. *Numerical Modeling in Materials Science and Engineering*. Berlin: Springer, 2003.