Primerjava napetostno-deformacijskih stanj

Domen Šeruga
Marko Nagode
Vili Malnarič
Jernej Klemenc

Napetostno-deformacijsko stanje v izdelku pri obratovanju je mogoče določiti s simulacijami ali meritvami. V članku predstavljamo oba pristopa na antivibracijskem nosilcu. Na nosilcu smo izbrali nekaj merilnih mest, na katerih smo izmerili deformacijsko stanje pri vnaprej določenih obremenitvenih primerih. Meritve smo izvajali z merilnimi rozetami in merilnimi lističi. Na nekaterih merilnih mestih smo z rezultati simulacij primerjali rezultate meritev z merilnimi rozetami in merilnimi lističi, nalepljenimi v smeri glavnih specifičnih deformacij. Preostala merilna mesta smo izbrali na območju geometrijskih prehodov, ker nas je zanimalo, kakšno je ujemanje med rezultati simulacij in meritev z merilnimi lističi na mestih koncentracij napetosti.

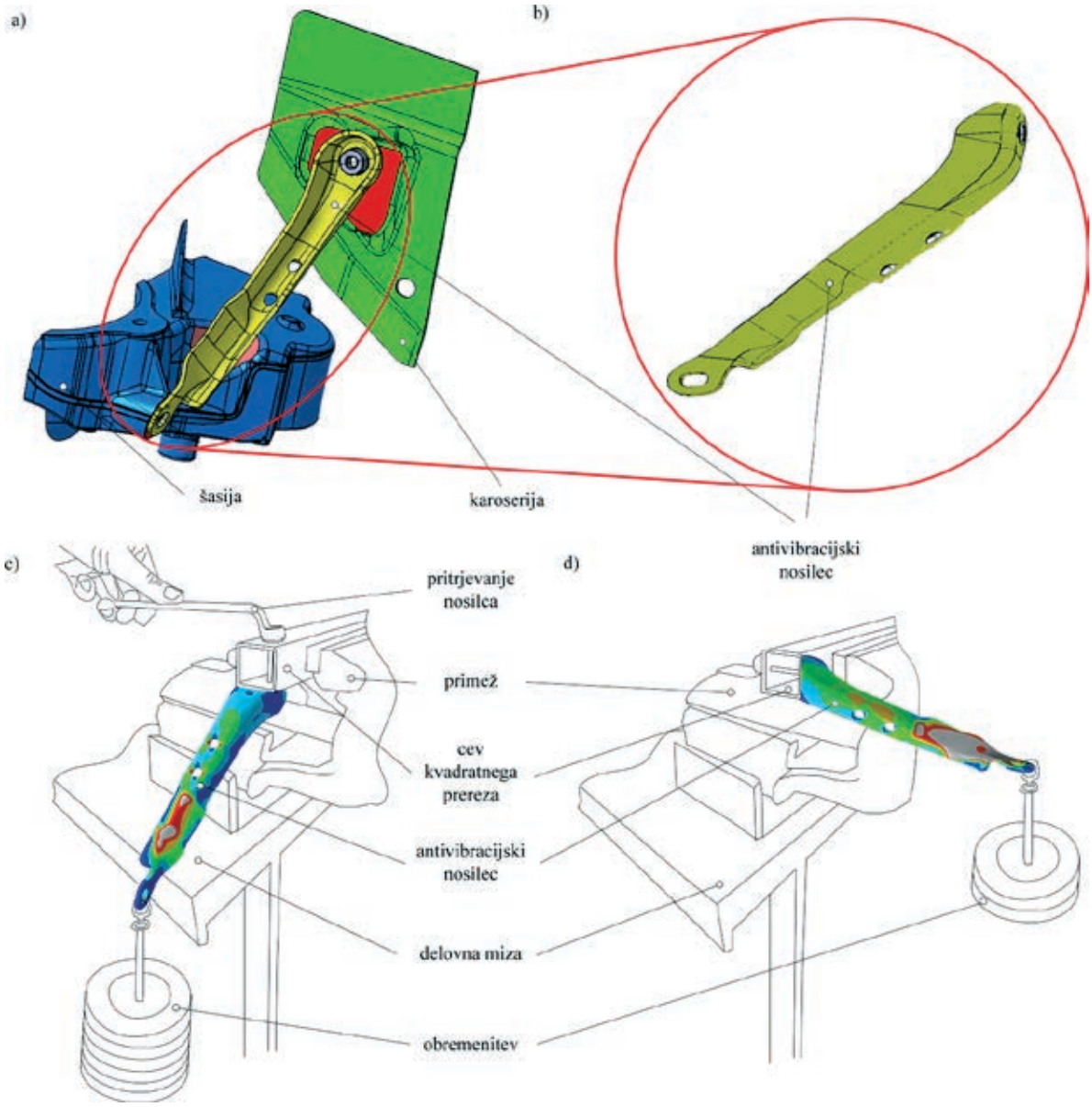
1 Uvod

Pri obratovanju se kot reakcija na zunanje obremenitve v mehanskem delu pojavi napetostno-deformacijski odziv. Sprememba mehanske obremenitve, temperature ali drugih vplivov iz okolja lahko spremeni tudi lastnosti gradiva in napetostno-deformacijski odziv v mehanskem delu, ob ponavljajočem se spreminjanju obremenitev pa se lahko pojavi celo prenehanje opravljanja funkcije mehanskega dela oz. njegova okvara. Da se v predvideni dobi trajanja okvara ne bi pojavila, je pomembno, da razvojni inženirji že v zgodnjih razvojnih fazah novega izdelka ali izboljšave obstoječega izdelka poznajo obremenitve, pri katerih bo izdelek obratoval. Pri teh obremenitvah določijo napetostno-deformacijsko stanje v izdelku in ga nato upoštevajo pri njegovem vrednotenju in morebitnih spremembah oblike. Napetostno-deformacijski odziv se z uveljavitvijo metode končnih elementov večinoma določa z lastno razvitimi aplikacijami ali eno izmed množice brezplačnih ali komercialno dostopnih programskih oprem. Kakšen je rezultat takšne simulacije, je odvisno od vrste uporabljene analize, kvalitete mreže končnih elementov, tipa končnih elementov in podanih parametrov gradiva. Šele v kasnejših fazah razvoja izdelka se napetostno-deformacijsko stanje določi tudi eksperimentalno na njegovem prototipu, vendar so takrat morebitne potrebne spremembe neprimerno dražje. Zato je smiselno, da se večina potrebnih sprememb izvede na izdelku v začetnih fazah razvoja. Pomembno je torej, da lahko simulacijam napetostno-deformacijskega stanja zaupamo. Pri tej študiji smo se hoteli prepričati, kako se določitev napetostno-deformacijskega stanja s simulacijami ujema z njegovo eksperimentalno določitvijo. Študijo smo izvedli na antivibracijskem nosilcu, ki ga proizvaja podjetje TPV (slika 1). Nosilec služi preprečevanju širjenja vibracij s šasije na karoserijo avtomobila. Izdelan je iz jeklene pločevine debeline 3 mm in je hladno preoblikovan v končno obliko.

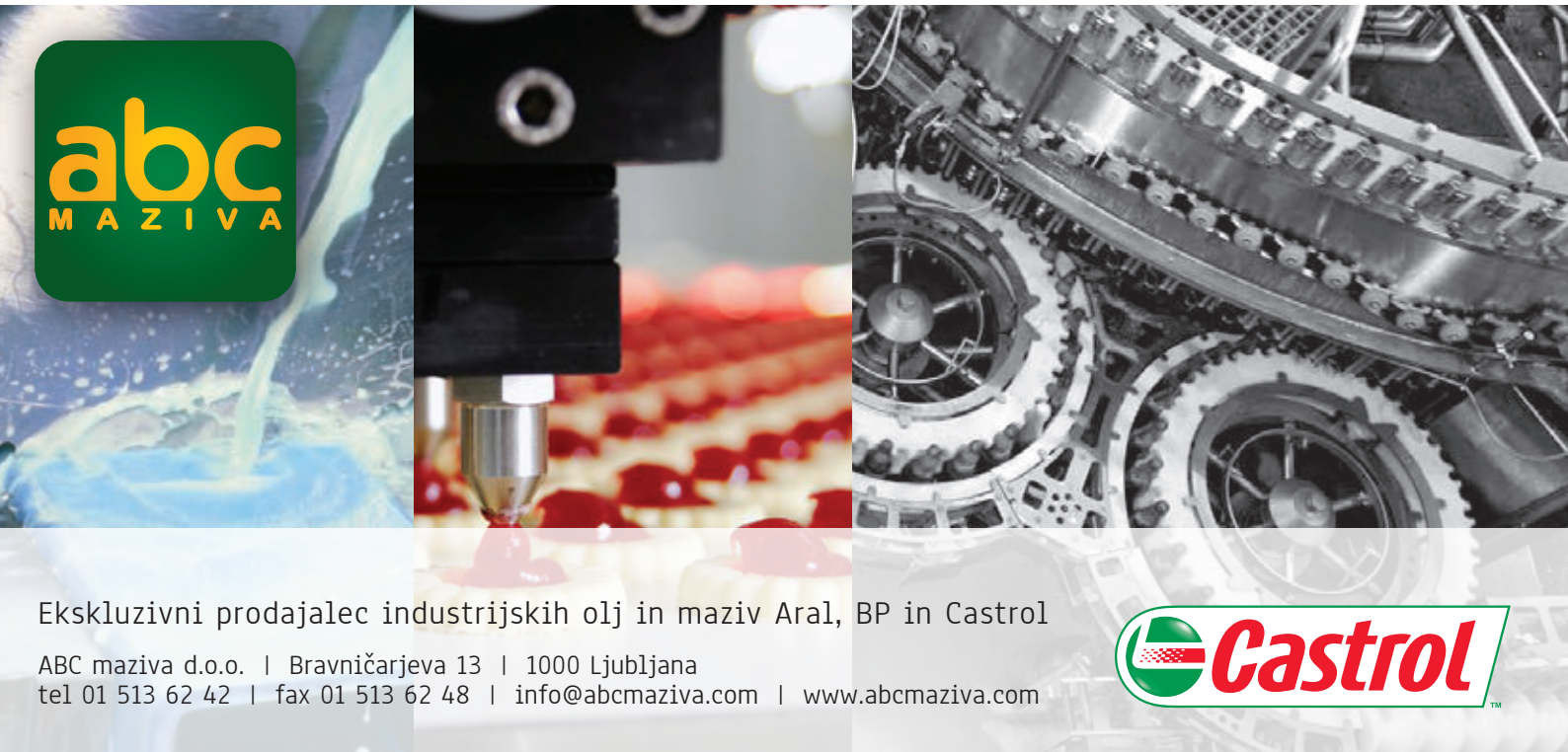
Domen Šeruga*, Marko Nagode , Jernej Klemenc ▪ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, Slovenija. *e-naslov: domen.seruga@fs.uni-lj.si

Vili Malnarič ▪ TPV, Novo mesto, Slovenija

Ključne besede: simulacija, meritve, metoda končnih elementov, merilni lističi, merilna rozeta.



» *Slika 1: a) Pozicija antivibracijskega nosilca v vozilu, b) analiziran antivibracijski nosilec, c) prvi obremenitveni primer in d) drugi obremenitveni primer.*



2 Metoda

Simulacijo obremenitve antivibracijskega nosilca smo izvedli s programsko opremo Abaqus 6.13-5. Uporabili smo 83.997 prostorskih elementov in 136.759 vozlišč ter elastične lastnosti gradiva, ker gradivo antivibracijskega nosilca pri obratovanju ne doseže meje plastičnosti – deluje torej v velikocikličnem področju. Podrobno smo analizirali dva obremenitvena primera, pri vsakem obremenitvenem primeru pa nekaj korakov, v katerih smo spreminjali velikost obremenitve. Obremenitvena primera sta prikazana na sliki 1. Izračunan deformacijski tenzor $\varepsilon_{ij}^{s,k}$ v globalnem koordinatnem sistemu smo pretvorili v deformacijski tenzor $\varepsilon_{ij}^{s,k*}$ v lokalnem koordinatnem sistemu z enačbo

$$\varepsilon_{ij}^{s,k*} = R\varepsilon_{ij}^{s,k}R^{T}, \tag{1}$$

kjer R predstavlja matriko enotskih vektorjev lokalnega koordinatnega sistema. Številka vozlišča je predstavljena z indeksom k, indeks s pa označuje, da je vrednost deformacijskega tenzorja dobljena s simulacijo. Lokalni koordinatni sistem smo postavili na površino nosilca, in sicer točno na mesto eksperimentalno nalepljenega merilnega lističa oz. merilne rozete. Dobljeni tenzor $\varepsilon_{ij}^{s,k*}$ smo nato pretvorili še v vektor glavnih specifičnih deformacij $\varepsilon_{i}^{s,k}$ z rešitvijo enačbe

$$\varepsilon_{ij}^{s,k*} - \varepsilon_{i}^{s,k}I = 0,\ i = 1,2,3, \tag{2}$$

kjer I predstavlja enotsko matriko. S poznavanjem ε_{ij}^{k*} in ε_{i}^{k*} je mogoče določiti tudi kot zasuka glavnih specifičnih deformacij θ_{s}^{k*} glede na izbran lokalni koordinatni sistem.

Pri eksperimentalni določitvi napetostno-deformacijskega stanja smo se odločili za dve poti. Ena pot je bila meritev z merilnim lističem, povezanim v polmostično Wheatstonovo vezavo, ki predstavlja najcenejšo možnost merjenja in zavzame le en merilni kanal, je pa listič potrebno nalepiti točno v smeri glavne napetosti, v nasprotnem primeru dobimo napačne odčitke. Rezultat takšne meritve smo označili z

$$\varepsilon^{e,k*} = \frac{4U_{o}}{KU_{i}K_{oj}}, \tag{3}$$

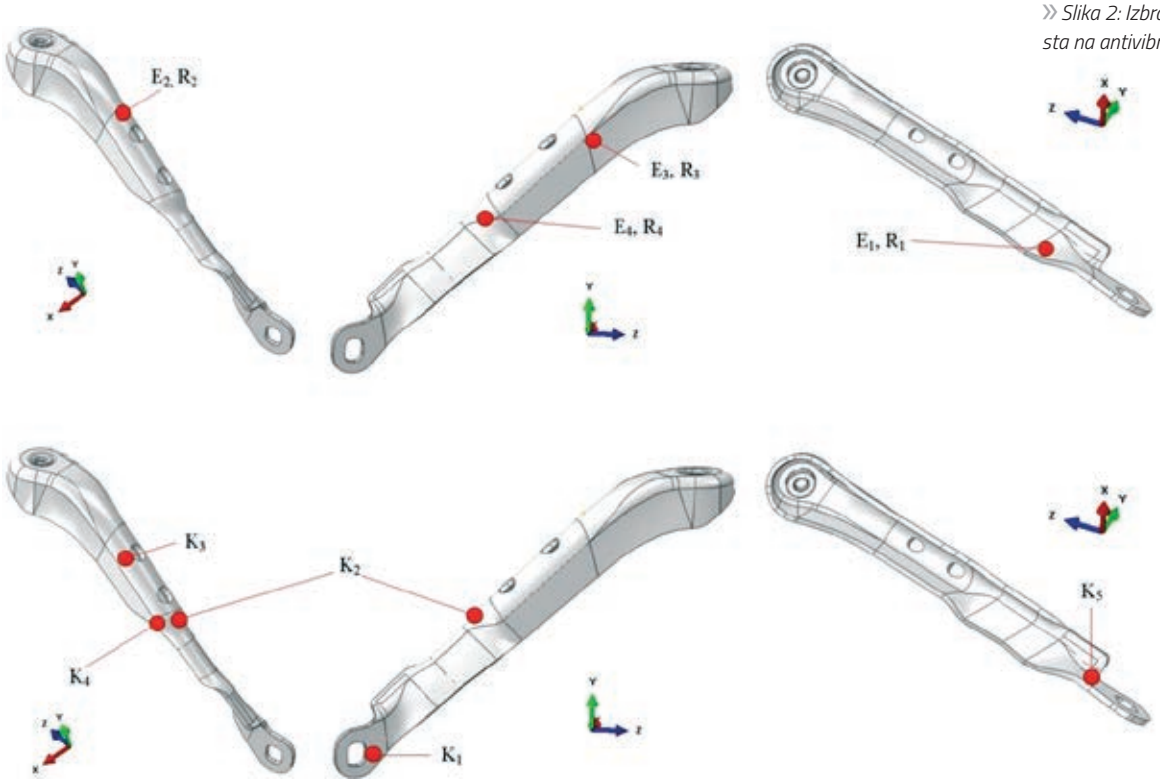
dobljen pa je neposredno iz odčitane izhodne napetosti U_o, poznavanja faktorja merilnega lističa K, faktorja ojačitve signala K_{oj} in napajalne napetosti U_i, indeks e pa označuje, da je vrednost specifične deformacije dobljena eksperimentalno. Druga pot je bila z uporabo merilne rozete, ki je dražja od merilnega lističa in za katero potrebujemo tri merilne kanale. Pri tej poti ni možnosti napake lepljenja pod napačnim kotom, ker orientacija merilne rozete na površini ni pomembna, na k-tem merilnem mestu pa merimo signale ε_1^k, ε_2^k in ε_3^k. Eksperimentalne vrednosti glavnih specifičnih deformacij $\varepsilon_{max}^{e,k*}$ in $\varepsilon_{min}^{e,k*}$ dobimo po enačbi

$$\varepsilon_{max,min}^{e,k*} = \frac{\varepsilon_1^k + \varepsilon_3^k}{2} \pm \sqrt{\frac{\left(\varepsilon_1^k - \varepsilon_2^k\right)^2 + \left(\varepsilon_2^k - \varepsilon_3^k\right)^2}{2}}, \tag{4}$$

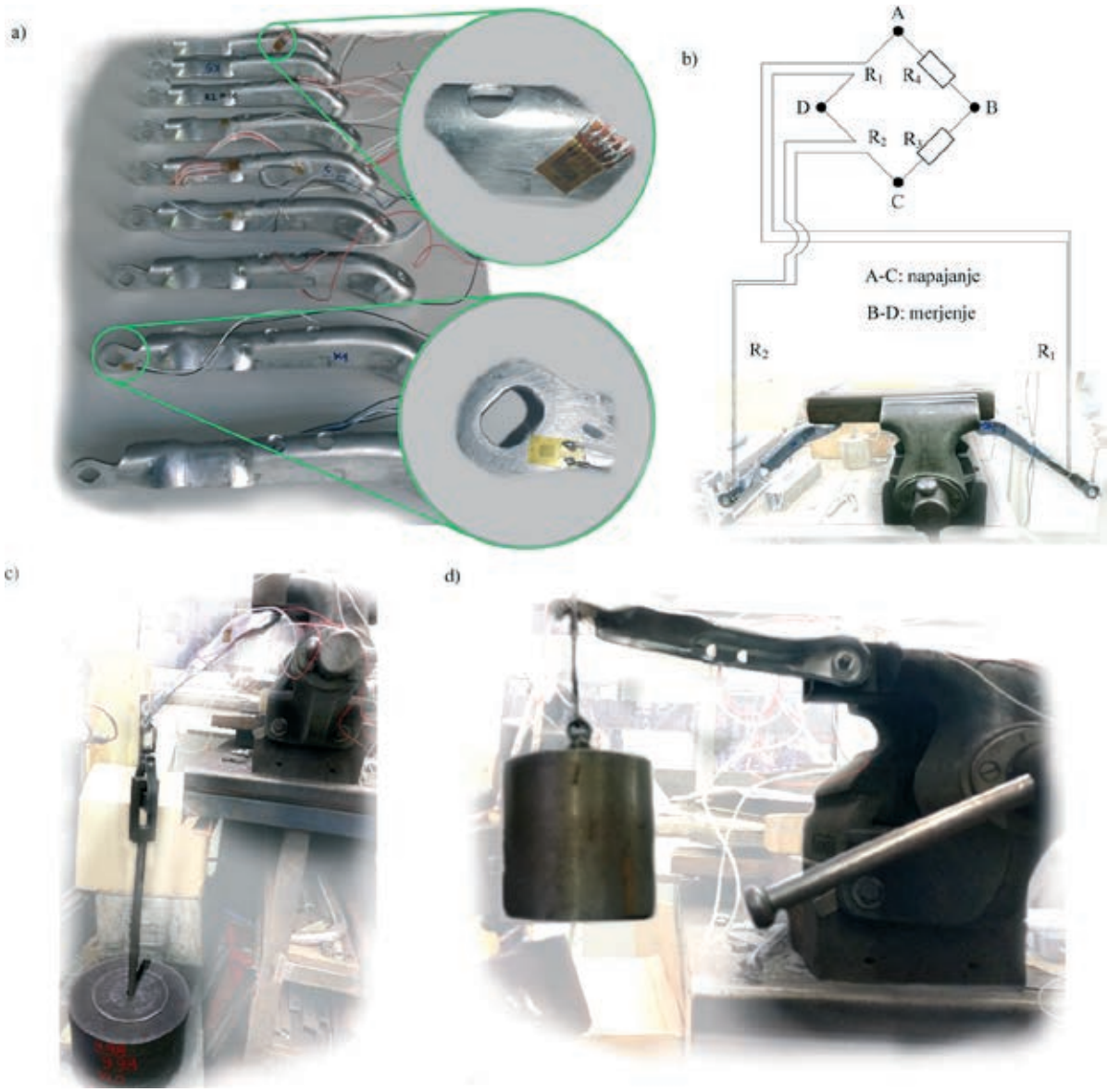
mogoče pa je določiti tudi eksperimentalni kot zasuka glavnih specifičnih deformacij θ_{e}^{k*} glede na postavitev merilne rozete kot

$$\tan\left(2\theta_{e}^{k,*}\right) = \frac{2\varepsilon_2^k - \varepsilon_1^k - \varepsilon_3^k}{\varepsilon_1^k - \varepsilon_3^k}. \tag{5}$$

Izbrali smo devet merilnih mest, na katerih smo določili napetostno-deformacijsko stanje (slika 2). Na razpolago smo imeli devet nosilcev, ki smo jih opremili z merilnimi lističi in merilnimi rozetami. Na eni strani smo jih z vijačno zvezo pritrdili na cev

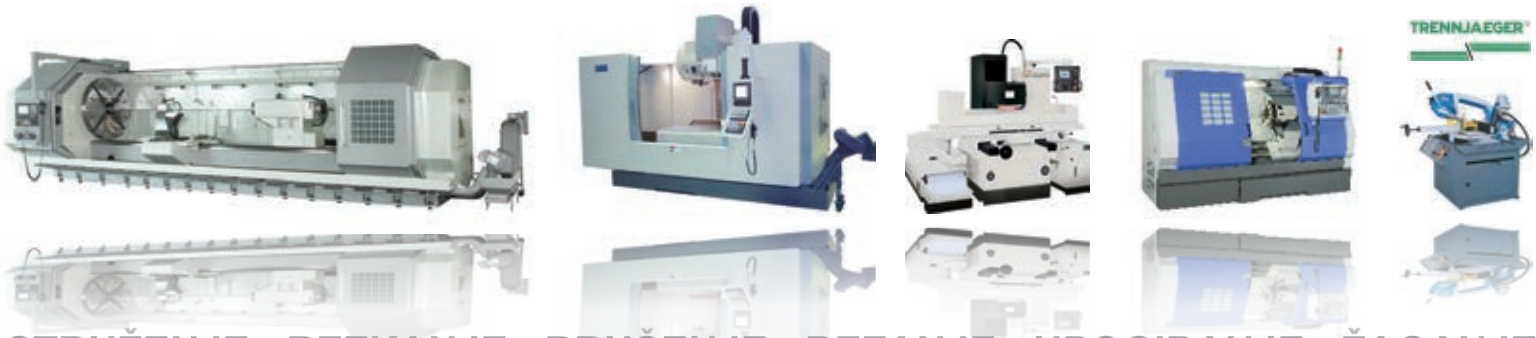


» Slika 2: Izbrana merilna mesta na antivibracijskem nosilcu.



» *Slika 3: a) Antivibracijski nosilci, opremljeni z merilnimi lističi in merilnimi rozetami, b) uporabljena polmostična vezava, c) prvi obremenitveni primer in d) drugi obremenitveni primer.*

MASCHINEN WAGNER ....z vami že od 1966



STRUŽENJE - REZKANJE - BRUŠENJE - REZANJE - UPOGIBANJE - ŽAGANJE

WAGNER MASCHINEN GMBH
Robert Bosh Str. 1
D-77871 RENCHEN
www.wagner-maschinen.de

Kontakt za Slovenijo, Avstrijo, Hrvaško, BIH in Srbijo:
Wagner Maschinen SLOVENIA, g. Milan Čivre,
tel.: 00386 40 688 280
mcivre@wagner-maschinen.de

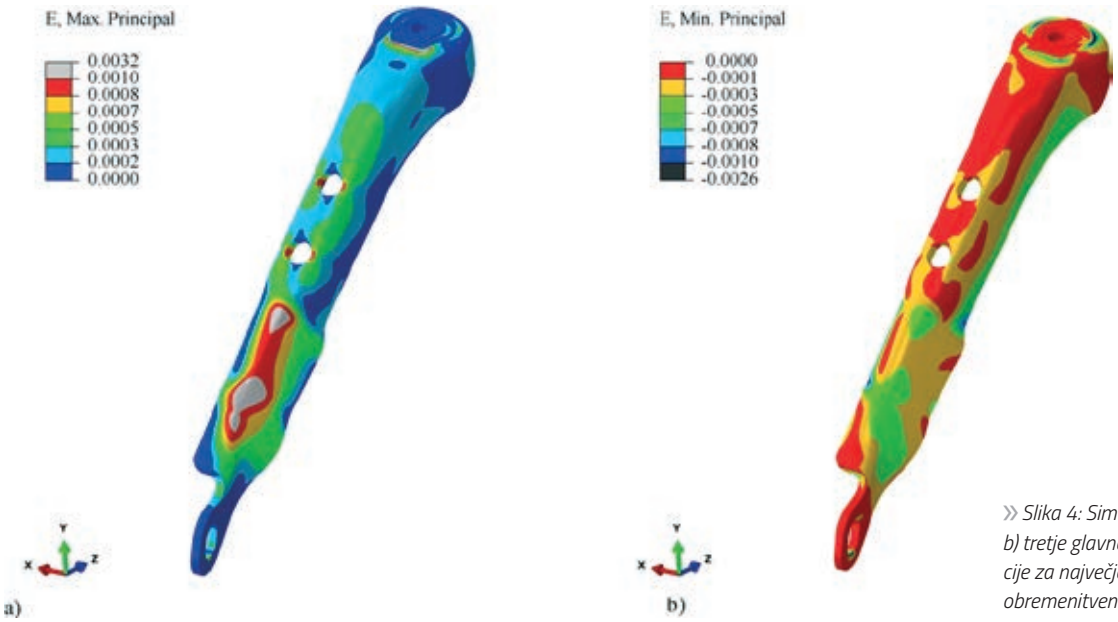
kvadratnega premera, ki smo jo vstavili v primež, na drugi strani pa smo jih obremenjevali z utežmi znane mase (slika 1). Z različno zasukanim vpetjem kvadratne cevi v primežu smo omogočili izbrana obremenitvena primera (slika 1). Merilne lističe smo povezali v polmostično Wheatstonovo vezavo, s čimer smo omogočili temperaturno kompenzacijo med meritvijo. Z merilnimi lističi in merilnimi rozetami opremljeni nosilci, uporabljena vezava in obremenitvena primera so prikazani na sliki 3.

3 Rezultati

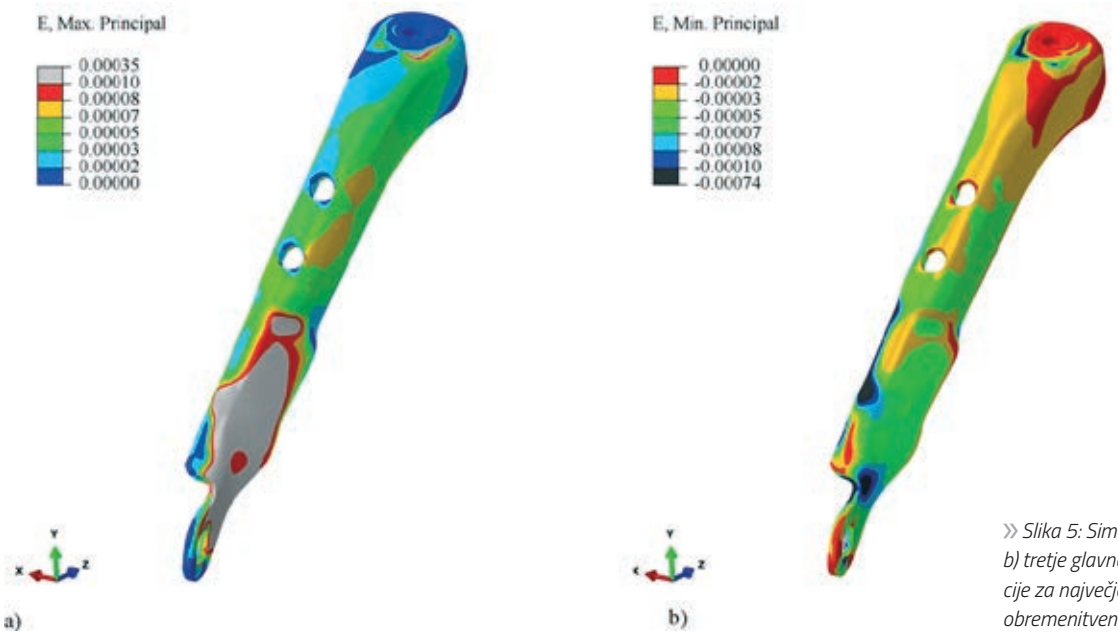
Simulirali smo dva obremenitvena primera, ki sta prikazana na slikah 1 in 3. Glavna specifična deformacija za največjo obremenitev prvega obremenitvenega primera je prikazana na sliki 4, za največjo obremenitev drugega obremenitvenega primera pa na sliki 5. Opazimo lahko, da se vrednosti glavnih specifičnih deformacij pri prvem obremenitvenem primeru dvignejo nad 0,1 %, v drugem obremenitvenem primeru pa so približno desetkrat nižje.

Predvideno merilno mesto K_4 eksperimentalno ni bilo izvedeno, merilna lističa na merilnih mestih E_2 in K_5 pa sta bila nalepljena postrani glede na simulirano smer glavnih napetosti. Dobljeni eksperimentalni rezultati so bili zato na merilnih mestih E_2 in K_5 glede na razliko med simuliranim in izmerjenim kotom korigirani in so v diagramih rezultatov označeni z znakom *.

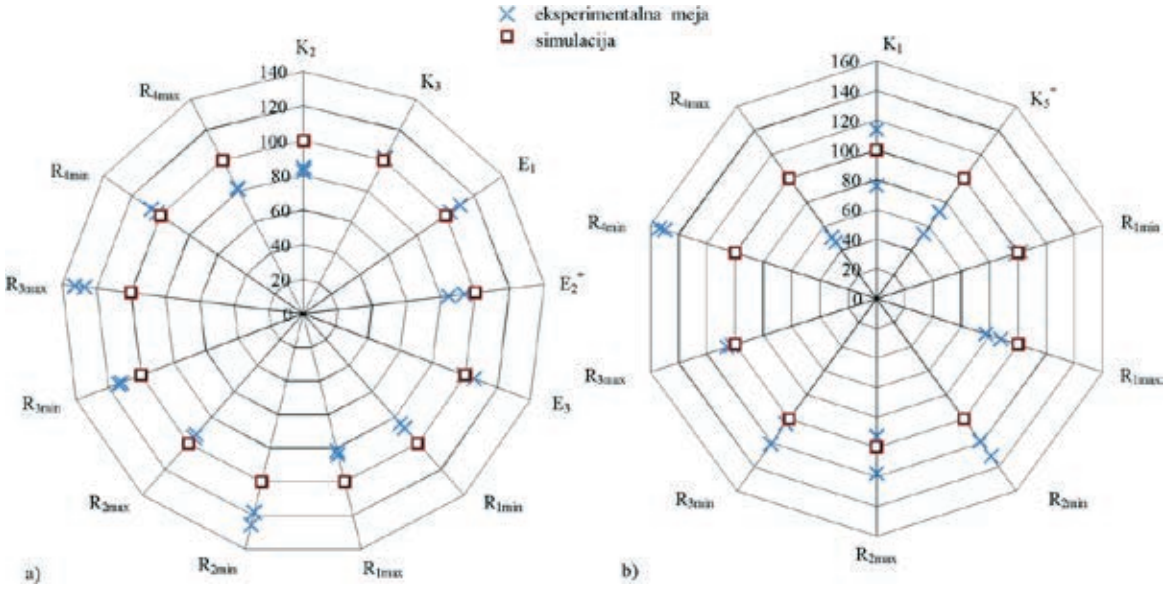
Primerjava rezultatov simulacij in meritev za merilna mesta pri obeh obremenitvenih primerih je grafično podana na slikah 6, 7 in 8.



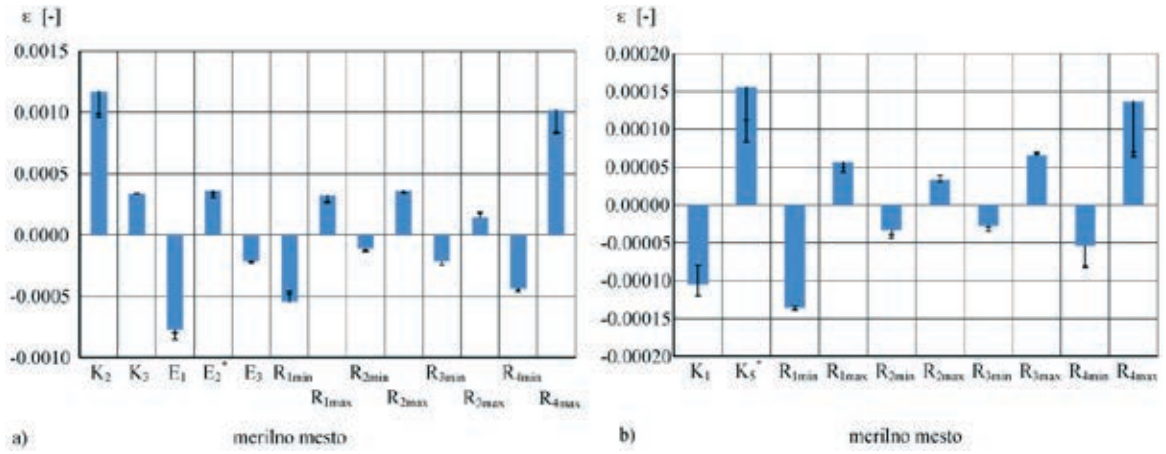
» *Slika 4: Simulirano polje a) prve in b) tretje glavne specifične deformacije za največjo obremenitev prvega obremenitvenega primera.*



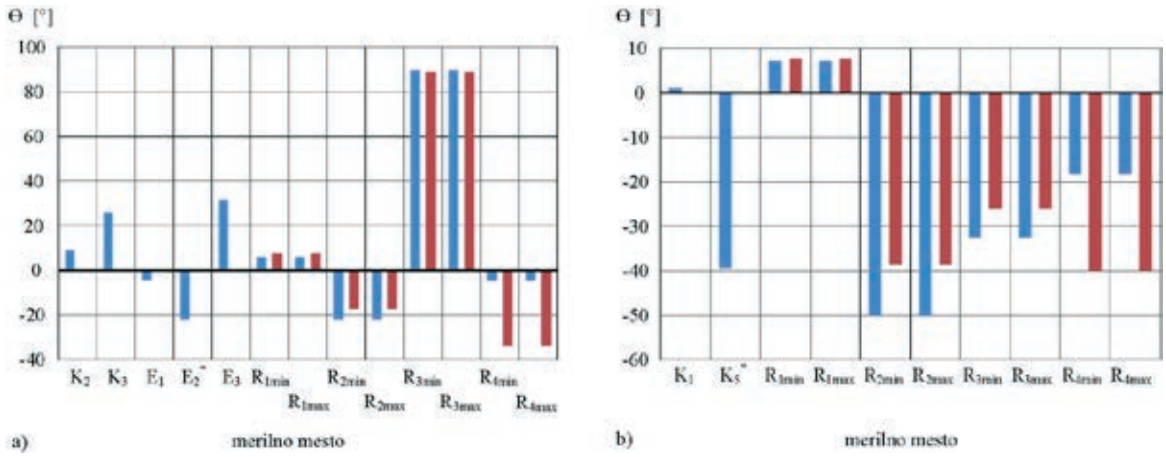
» *Slika 5: Simulirano polje a) prve in b) tretje glavne specifične deformacije za največjo obremenitev drugega obremenitvenega primera.*



» *Slika 6: Primerjava odstopanj simulacij in meritev za a) prvi in b) drugi obremenitveni primer. Vrednost simulacije je nastavljena na 100 % vrednost, eksperimentalna vrednost pa je za vsako merilno mesto predstavljena s spodnjo in zgornjo mejo meritve.*



» *Slika 7: Specifične deformacije simulacij in meritev za a) prvi in b) drugi obremenitveni primer. Vrednost simulacije je prikazana s stolpcem za posamezno merilno mesto, eksperimentalna vrednost pa je predstavljena s spodnjo in zgornjo mejo meritve.*



» *Slika 8: Primerjava glavnih smeri simulacij in meritev za a) prvi in b) drugi obremenitveni primer. Levi stolpec predstavlja vrednost, določeno iz simulacije, desni stolpec pa vrednost, določeno iz meritev (velja za merilno rozeto).*

4 Diskusija

Opazimo lahko, da so velikosti primerjanih specifičnih deformacij pri prvem obremenitvenem primeru večje kot pri drugem, razlika med spodnjo in zgornjo eksperimentalno mejo je zato manjša pri močnejšem signalu. Če bi bile meritve narejene brez šuma, s simulacijo pa bi napovedali povsem natančno vrednost specifične deformacije na izbranem merilnem mestu, bi vsi rezultati v diagramih na sliki 6 ležali na 100 % vrednosti. Ker pride do odstopanj, izberemo lego simulacij za vrednost 100 %, medtem ko pomerjene vrednosti prikažemo z razliko od 100 %. Vidimo, da se vrednosti simulacij in eksperimenta redko razlikujejo za več kot 20 %, le mesti R_{2min} in R_{3max} pokažeta 27 oz. 33 % odstopanje pri prvem obremenitvenem primeru ter merilni mesti R_{4min} in R_{4max} pokažeta več kot 40 % odstopanje pri drugem obremenitvenem primeru. Slika 7 potrdi, da je v primeru R_{2min} in R_{3max} posledica za takšno odstopanje nizka absolutna vrednost pomerjenega signala. Razlog za odstopanje na merilnih mestih R_{4min} in R_{4max} v drugem obremenitvenem primeru je verjetno le delno prilepljena merilna rozeta, ker je bilo merilno mesto 4 namenoma izbrano na geometrijskem prehodu in zahtevno za lepljenje. Temu razlogu pritrjuje dejstvo, da se simulirane in eksperimentalne glavne smeri na sliki 8 močno razlikujejo, medtem ko se vrednosti glavnih specifičnih deformacij v prvem obremenitvenem primeru ujemajo, v drugem pa razlikujejo.

Nasprotno lahko vidimo, da je odstopanje na merilnih mestih K_3 in E_3 minimalno, kar je predvsem v primeru K_3 presenetljivo, saj je bil merilni listič nalepljen neposredno zraven izvrtine, ki predstavlja konico napetosti.

Opazimo lahko dobro ujemanje simulacij in meritev z merilno rozeto na merilnih mestih R_1, R_2 in R_4 v prvem obremenitvenem primeru ter na merilnih mestih R_1, R_2 in R_3 v drugem obremenitvenem primeru. Primerjava glavnih smeri na merilnih mestih R_1, R_2 in R_3 potrjuje ujemanje ne glede na obremenitveni primer.

Dober vpogled v merjenje z merilnimi lističi, nalepljenimi v smeri glavnih napetosti, ter merilnimi rozetami pokaže primerjava absolutnih vrednosti specifičnih deformacij za E_1 in R_{1min}, E_2 in R_{2max} ter E_3 in R_{3min} za prvi obremenitveni primer na sliki 7. Le pri primerjavi E_1 in R_{1min} je vidna večja razlika, kar lahko pripišemo razliki v dejanskih pozicijah merilnega lističa oz. merilne rozete na mestu, kjer je gradient minimalne specifične deformacije velik (slika 4), sicer pa razlika med merilnima mestoma E_2 in R_{2max} oz. E_3 in R_{3min} skoraj ni opazna. Merjenje z merilnim lističem, nalepljenim v smeri glavnih napetosti, je torej povsem enako merjenju z merilno rozeto, vendar pa mora biti merilni listič nalepljen v pravi smeri. V nasprotnem primeru so meritve z merilnim lističem nepravilne.

Zaradi velikosti merilnega lističa je dejansko konico napetosti pri geometrijski spremembi oblike nemogoče določiti, vendar pa primerjava simulacij in eksperimenta na merilnih mestih K_1, K_2, K_3 in K_5 kaže, da je simulirana vrednost napetosti na pozicijah merilnih lističev primerljiva z eksperimentalnimi opažanji. Iz tega bi lahko sklepali, da je tudi vrednost simulirane konice napetosti blizu dejanskemu stanju.

5 Zaključek

Pri študiji primerjave določitve napetostno-deformacijskega stanja s simulacijami in eksperimenti na antivibracijskem nosilcu smo pokazali, da je s simulacijami brez upoštevanja odstopanja geometrije in raztrosa lastnosti gradiva mogoče povsem verodostojno določiti napetostno-deformacijski odziv gradiva v elastičnem območju. Potrdili smo, da je z merilnimi lističi, nalepljenimi v eni izmed glavnih smeri, mogoče določiti vrednost glavnih specifičnih deformacij, čeprav je za pravilno določitev deformacijskega tenzorja bolj zanesljiva uporaba merilne rozete. Čeprav je konice napetosti težko pomeriti, se simulirane in eksperimentalne vrednosti specifičnih deformacij na pozicijah merilnih lističev pri geometrijskih prehodih ujemajo.

Literatura

[1] Klemenc, J. Efektivnost izdelkov. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2017, ISBN 978-961-6980-31-9.

[2] Šeruga, D. in Klemenc, J. Efektivnost izdelkov: predloga k vajam pri predmetu. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2015. Dostopno na http://web.fs.uni-lj.si/kserv/

[3] Hoffmann, K. Anwendung der Wheatstone Brückenschaltung. Darmstadt: HBM, 1978.

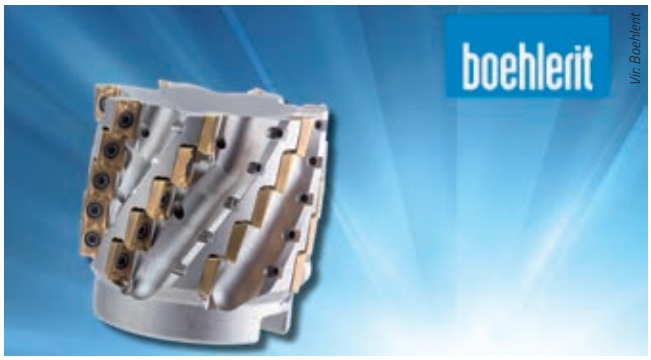
Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo generaciji študentov pri predmetu Efektivnost izdelkov na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani v akademskem letu 2017/2018, ki je pomagala pri izvedbi meritev, in g. Blažu Blatniku za pomoč pri realizaciji študije. Projekt EVA4green št. OP20.00362 je sofinanciralo Ministrstvo za znanost, šolstvo in šport Republike Slovenije iz državnega proračuna. Raziskovalni program št. P2-0182 Razvojna vrednotenja je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna. Avtorji se zahvaljujejo za podporo.

Učinkovito in ekonomično

Podjetje Boehlerit, specialist za karbidne trdnine in orodja za odrezavanje, predstavlja novo serijo spiralnih frezal s premeri 20 do 63 mm in tako širi svoj obstoječi razpon orodij za frezanje ISO 90P

Spiralni frezarji so popolna novost v obstoječem programu orodij za frezanje proizvajalca Boehlerit, avstrijskega podjetja iz Kapfenberga. André Feiel, produktni vodja za področje frezanja pri podjetju Boehlerit, razlaga, kako ta tip orodij za frezanje izstopa s svojimi izjemnimi lastnostmi odrezavanja in po visoki produktivnosti. Spiralna frezala omogočajo izjemno globino rezanja ter podajanja do 0,3 mm in s tem visok odvzem materiala. Spiralna frezala so uporabna na vseh področjih, kjer se obdelujejo kovine. Da bi izpolnjevala širok spekter zahtev obdelave, Boehlerit ponuja pestro izbiro rezalnih ploščic za spiralna frezala, kot so APKT 1003



Vir: Boehlerit

iz standardnega nabora ISO 90P. Poleg tega je uporaba spiralnih frezal zelo cenovno učinkovita, kar je še posebej ugodno za manjša podjetja, ki bodo lahko izkoriščala prednost nizke cene na rezalni rob.

› *www.boehlerit.at* › *www.kactrade.com*