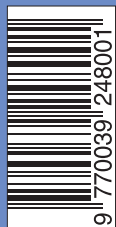
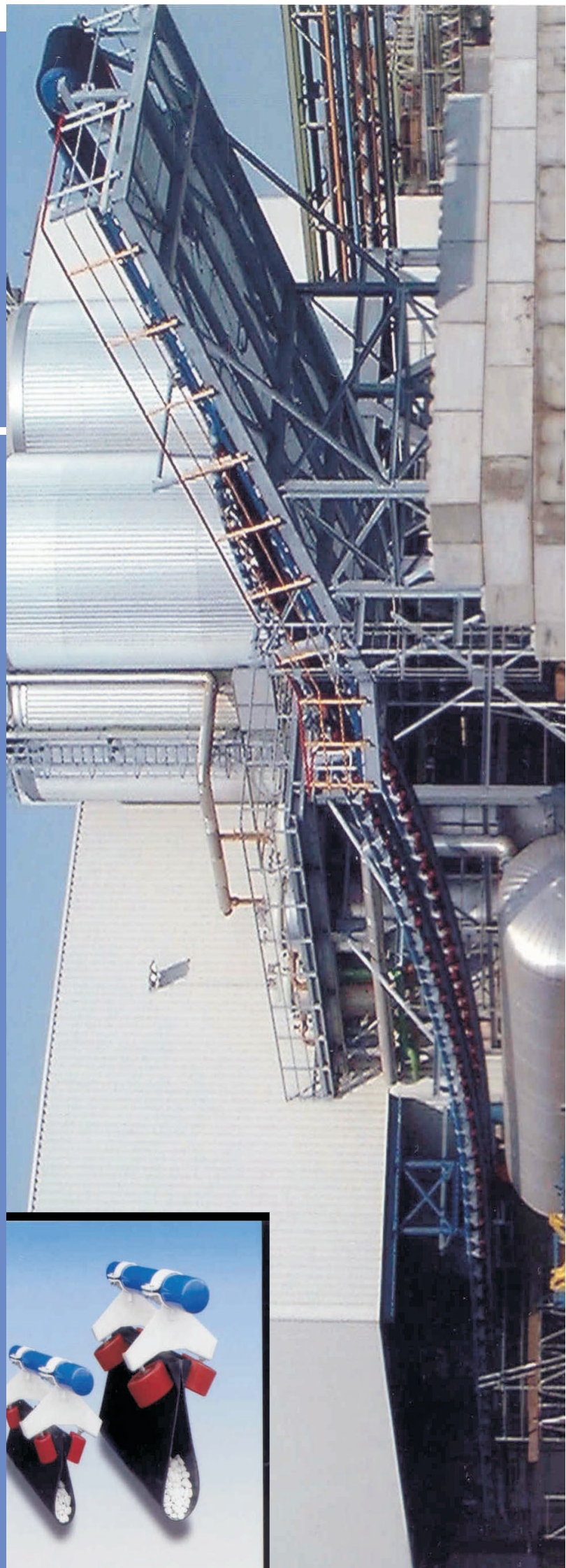


1. Laserski anamorfni profilomer
A Laser Anamorph Profilometer
2. Eksperimentalno preskušanje prenosa toplote v Lorenzovem postopku z uporabo zeotropnih zmesi
Experimental Testing of the Heat Transfer in a Lorenz Process Using Zeotropic Mixtures
3. Entropijska analiza sotočnih prenosnikov toplote
Entropy Analysis of Parallel-Flow Heat Exchangers
4. Izbrani vidiki celovitosti površine aluminijeve zlitine pri običajni in obdelavi z velikimi hitrostmi: Spremembe mikrotvrdote in hrapavosti površine
Selected Aspects of the Surface Integrity of Aluminium Alloy in High-Speed Machining: Microhardness Variations and Surface Roughness
5. Tehnološke zahtevnosti pri izdelavi plinskega odvodnika
A Precision Techniques for Gas-Arrester Manufacturing



Vsebina

Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering
letnik - volume 49, (2003), številka - number 2

Razprave

- Jezeršek, M., Možina, J.: Laserski anamorfní profilometer 76
- Soldo, V., Čurko, T., Zanki, V.: Eksperimentalno preskušanje prenosa toplote v Lorenzovem postopku z uporabo zeotropnih zmesi 90
- Galović, A., Živić, M., Andrassy, M.: Entropijska analiza sotočnih prenosnikov toplote 100
- Vančček, D., Mádl, J., Soković, M.: Izbrani vidiki celovitosti površine aluminijeve zlitine pri običajni in obdelavi z velikimi hitrostmi: Spremembe mikrotrdote in hrapavosti površine 111
- Pregelj, A., Breclj, F., Pirih, A., Murko, V.: Tehnološke zahtevnosti pri izdelavi plinskega odvodnika 119

Poročila

Strokovna literatura

Osebne vesti

Navodila avtorjem

Papers

- Jezeršek, M., Možina, J.: A Laser Anamorph Profilometer 76
- Soldo, V., Čurko, T., Zanki, V.: Experimental Testing of the Heat Transfer in a Lorenz Process Using Zeotropic Mixtures 90
- Galović, A., Živić, M., Andrassy, M.: Entropy Analysis of Parallel-Flow Heat Exchangers 100
- Vančček, D., Mádl, J., Soković, M.: Selected Aspects of the Surface Integrity of Aluminium Alloy in High-Speed Machining: Microhardness Variations and Surface Roughness 111
- Pregelj, A., Breclj, F., Pirih, A., Murko, V.: A Precision Techniques for Gas-Arrester Manufacturing 119

Reports

Professional Literature

Personal Events

Instructions for Authors

Laserski anamorfni profilomer

A Laser Anamorph Profilometer

Matija Jezeršek - Janez Možina

Prispevek opisuje načelo, razvoj, umeritev in testiranje laserskega anamorfnega profilomera. Profilomer deluje na podlagi laserske triangulacije z linijsko osvetlitvijo površine in digitalno obdelavo posnetih slik. Z vključitvijo anamorfne optike je dosežena prilagoditev merilnega območja v navpični smeri in posledično tudi večja ločljivost sistema vzdolž navpične smeri. Sistem se odlikuje s čvrsto in modularno konstrukcijo, natančnostjo ter z izvirno zasnovanim postopkom umeritve, ki omogoča hitro in zanesljivo merjenje.

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: profilometri laserski, optika anamorfna, razvoj, umerjanje, preskušanje)

This paper presents the principle, development, calibration and testing of a laser anamorph profilometer. A profilometer is based on the laser-triangulation principle with a laser plane projecting on the surface and digital processing of the acquired images. A lens with anamorph optics is used to fit the vertical measuring range and, consequently, to increase the vertical resolution. The system excels in terms of its robust and modular construction, its precision and uniquely designed calibration procedure, and its ability to make fast and reliable measurement.

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: laser profilometers, anamorphic optics, development, calibration, testing)

0 UVOD

Metode merjenja oblike teles na temelju laserske triangulacije se v svetu iz dneva v dan bolj uveljavljajo na številnih področjih. Med najzanimivejše primere uporabe teh metod spadajo dimenzijski nadzor izdelkov, robotska navigacija, diagnostika v medicini ter digitalizacija muzejskih predmetov [1]. V mnogih primerih pomeni uporaba brezdotične metode merjenja edino možnost. To so predvsem primeri, ko imamo opravka z gibajočim se merjencem, kadar je treba meriti obliko mehke površine in/ali v primeru težkih delovnih razmer na mestu merjenja. Kot skrajni primer naj omenimo geometrijski nadzor izvlečenega gumijastega traku takoj ob izstopu iz orodne glave [2]. Temperatura traku je tam še izredno visoka, guma je še v napol tekočem stanju in kar je najpomembnejše, nadzor je treba izvajati brez ustavljanja postopka izdelave.

Laserski anamorfni profilomeri (LAP), predstavljeni v tem prispevku, temeljijo na že omenjeni laserski triangulaciji. Laserski projektor ustvari svetlobno ravnino, katere presečišče z merjeno površino vidimo kot lasersko črto. Ta se skozi anamorfni objektiv preslika na zaznavni element kamere. Črta na sliki je zaradi razmaknjenosti projektorja in kamere ukrivljena skladno z merjenim profilom površine.

0 INTRODUCTION

Laser-based object-shape measurement techniques are becoming more and more popular in numerous technical domains. The most interesting areas are product inspection, reverse engineering, robot navigation, medical diagnostics and the digitalization of museum artifacts [1]. In many cases the use of non-contact methods for the measurement of shape is the only choice because of the environment, a moving object and/or a soft surface, which do not allow probe contact. An example of this is the profile inspection of an extruded rubber band in a tire-manufacturing process [2]. The temperature of the band is extremely high, the rubber is still in a semi-liquid state and, most importantly, the inspection must be conducted without any interruptions.

Laser anamorph profilometers (LAPs), which are described in this paper, are based on a laser-triangulation technique. The range information is gathered by projecting a laser plane onto the surface and imaging this line through an anamorph lens. The imaged line is curved in accordance with the measured profile of the surface because of the distance between the camera and the projector.

Posebnost našega profilomera je anamorfni objektiv, ki daje različni optični povečavi v navpični in vodoravni smeri. Anamorfna optika je ustrežnejša od običajne sferične optike predvsem v primerih zahtev po velikem merilnem območju v eni smeri in veliko ločljivostjo ter manjšim merilnim obsegom v drugi smeri. Z izbiro ustreznih optičnih povečav v posamezni smeri lahko dosežemo optimalno razmerje med merilnim obsegom in natančnostjo merilnika. Takšno optiko so za potrebe laserske profilometrije med prvimi uporabili Blais s sodelavci [3], neodvisno od njih pa smo za potrebe profilometrije razvili anamorfne objektivne pri nas [2].

Bistvenega pomena za uporabnost merilnika je ustrezen postopek umeritve. Glavni vodili pri snovanju le tega sta natančno merjenje referenčnih točk ter ustrezen model preslikave. Ta mora upoštevati optične popačitve, hkrati pa omogočati neposreden izračun parametrov brez predhodnega poznavanja začetnih približkov. Doslej znani načini merjenja referenčne geometrije so zapleteni zaradi zahtevne izdelave etalonov in zaradi potrebe po premikanju v več smereh ([3] do [5]). Prav tako je zapletena tudi preslikava dvorazsežne slike, ki jo posname kamera, v prostor. V ta namen večina avtorjev uporablja nelinearne fotogrametrične modele [4] do [6], ki so neprimerni za preslikavo z anamorfno optiko.

Da bi odpravili tovrstne težave, smo za LAP zasnovali izvirni umeritveni postopek. Meritev referenčnih točk izvajamo z etalonom v obliki poševne plošče z utori trikotnega prereza. S premikanjem plošče se spreminja višina profila, medtem ko so utori namenjeni za določitev lege referenčnih točk. Polinomski model preslikave omogoča neposreden izračun parametrov, hkrati pa dopušča korekcijo popačitev in različni optični povečavi, kar je glavna značilnost anamorfne optike.

1 OPIS SISTEMA

Razporeditev laserskega profilomera je prikazana na sliki 1. Sestavljen je iz projektorja laserske črte, kamere CCD z anamorfnim objektivom, pomične mize in osebnega računalnika, ki iz zajete video slike izračuna obliko profila. Računalnik krmili tudi pomično mizo ter moč projektorja, s čimer je omogočeno zaporedno merjenje profilov prek celotne površine ter optimalno delovanje na površinah s spremenljivo optično odbojnostjo.

V nadaljevanju se bomo sklicevali na skupni koordinatni sistem (SKS - WCS) ter koordinatni sistem slike (KSS - ICS). Lega SKS (X, Y, Z) je takšna, da se ravnina $Y=0$ ujema s svetlobno ravnino, os Z se ujema z optično osjo projektorja, izhodišče pa ima v presečišču svetlobne ravnine z optično osjo objektivna. KSS se ujema z ravnino CCD-ja, os u je vzporedna z vrsticami, os v pa s stolpci CCD-ja. Usmeritev merilnika glede na pomično mizo je takšna,

The specialty of our profilometer is the anamorph lens, which provides different magnifications of two mutually perpendicular optical axes. This means that in the case of unequal measuring ranges in the horizontal and vertical directions, the anamorph lens gives us the optimal measuring range in terms of resolution ratio. Blais et al [3] were the first to use this technology in laser profilometry; but the anamorph lenses that we need for our profilers were developed without the cooperation of Blais, nor were they influenced by him in any way [2].

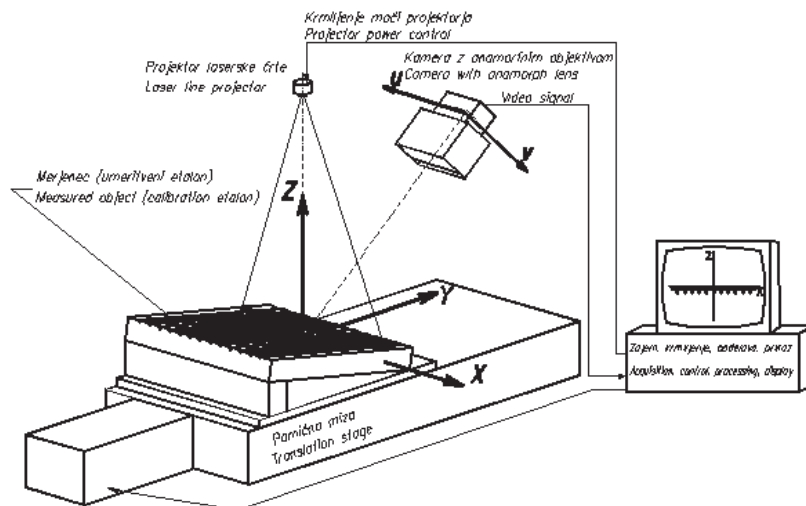
An appropriate calibration procedure is an essential step in the development of a profilometer. The main guidance came from measurements of the exact reference points and an appropriate choice of transformation model, which should consider optical aberrations without using an iterative-numerical calculation of the parameters. The complicated geometry of the reference etalon and the requirements of multi-axis movement ([3] to [5]), makes existing calibration methods difficult to implement. The transformation of points from the camera's plane back to 3-D space is also complicated. Many authors use nonlinear photogrammetry models [4] to [6], which are not convenient when an anamorph lens is used.

To overcome these difficulties, a unique calibration procedure was designed for our LAP. The reference-point measurement is performed using an inclined, shaped etalon with triangular grooves. Moving the etalon in a direction perpendicular to the laser plane changes the height of the measured profile, and the transverse position of the reference points is determined with grooves. A polynomial model enables a straightforward calculation of the parameters using linear algebra, as well as correction of the various optical aberrations and magnifications for each optical axis, which is the basic property of an anamorph lens.

1 SYSTEM DESCRIPTION

The configuration of the LAP is shown in Figure 1. It is composed of a laser line projector, a CCD camera with an anamorph lens, a translation stage and a personal computer, which acquires video frames and then calculates the profiles from them. The computer also controls the translation stage and the projector power, which enables repeated scanning of the entire surface and optimal performance on surfaces with variable reflectance.

In the text that follows we will refer to the world coordinate system (WCS) and the image coordinate system (ICS). The orientation of the WCS (X, Y, Z) is such that the plane $Y=0$ is coincident with the light plane and its origin lies where the light plane and the camera's optical axis intersect. The ICS lies on the CCD plane, the axis u is parallel with the CCD rows and the axis v with the image columns. The orientation of the measurement with respect to the



Sl. 1. Poglavitni elementi laserskega anamorfnega profilomera ter njihova postavitve
 Fig. 1. The main elements of a laser anamorph profilometer and their setup

da je optična os projektorja normalna na površino mize, le-ta pa se giblje v smeri normalno na svetlobno ravnino.

translation table is such that the projector's optical axis is perpendicular to the translation table, which moves perpendicularly to the light plane.

1.1 Anamorfna preslikava

1.1 Anamorph image formation

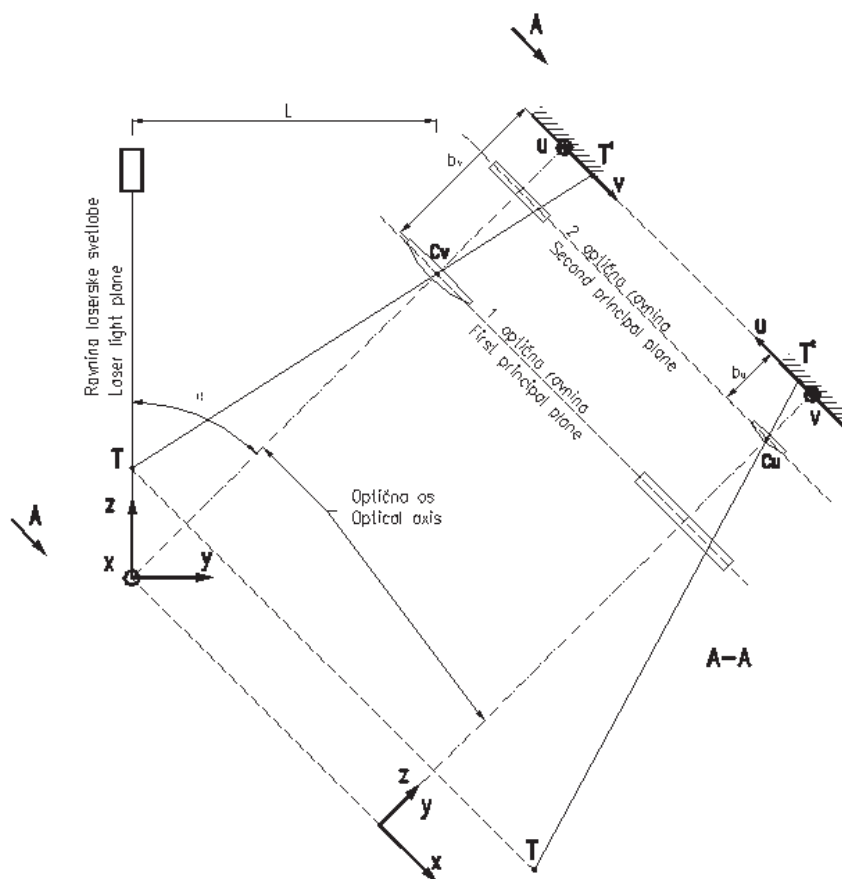
Uporaba anamorfni optičnih sistemov je dandanes na nekaterih področjih izredno razširjena. Njihova bistvena lastnost sta različni optični povečavi v glavnih, medsebojno pravokotnih smereh slike. Astigmatizem, ena izmed mogočih napak človeškega očesa, ki nastane zaradi nesimetrične oblike roženice, se odpravlja z uporabo sferocilindričnih ali celo toroidnih leč. Optika polprevodniških laserjev je lahko prav tako anamorfna. Svetlobni snop polprevodniških laserjev je zaradi oblike resonatorja divergentno nesimetričen. Z uporabo prizmatičnih ali cilindričnih optičnih elementov pa je mogoče doseči okrogel laserski snop namesto običajnega eliptičnega. V primeru potrebe po svetlobni ravnini je nesimetričnost svetlobnega snopa celo zaželena. Z uporabo ene same cilindrične leče zbiramo svetlobo le v smeri najmanjše divergence, v drugi smeri pa se širi nepopačeno naprej. Takšen način oblikovanja svetlobne ravnine uporabljamo med drugim v naših profilomerih.

Anamorph optical systems are nowadays widely used in some fields. Their main property is a range of optical magnifications along mutually perpendicular meridians. Astigmatism, a defect of the human eye, can be corrected with spherocylindrical or even torically shaped lenses. Diode-laser optics can also have an anamorph optical system. They have a divergent asymmetric output due to diffraction effects in the asymmetric region of the laser cavity. Prisms or cylindrical optics are used to project a circular laser beam instead of the usual elliptical one. The divergent asymmetric output of semiconductor lasers is even desired in the case of light-plane formation. A single cylindrical lens is used to focus light in the direction of lower divergence. Such a principle of light-plane formation is also used in our profilometers.

V našem primeru smo uporabili anamorfni objektiv z namenom prilagoditve merilnega obsega danim zahtevam. S tem je boljše izkoriščena površina zaznavnega elementa - CCD-ja ter zaradi tega izboljšana ločljivost merilnika. Anamorfni objektiv sestavljata dve medsebojno pravokotno cilindrični leči. Prva daje sliko v smeri v , druga pa v smeri u . Na sliki 2 je prikazano načelo triangulacijskega merjenja z uporabo anamorfnega objektiva. Točka T leži na ravnini laserske svetlobe in se skozi objektiv preslika v točko T' na ravnini CCD-ja. Upoštevajoč znane geometrijske parametre dobimo naslednjo odvisnost za koordinato z :

In our case the anamorph lens is used to fit the measuring range to the camera's sensor area. In this way the sensor area is used more efficiently and, as a result, the resolution is improved. An anamorph lens is comprised of two, mutually orthogonal cylindrical lenses. The first one forms the image in the v direction and the second one in the u direction. Figure 2 shows the image formation and triangulation principle using an anamorph lens. Point T, which lies on the light plane, is transformed through the lens at point T' on the sensor's plane. According to known geometrical parameters, we get the following relationship for the z coordinate:

$$z = \frac{L \cdot v}{\sin^2(\phi) \cdot \left(b_v + \frac{v}{\tan(\phi)} \right)} \quad (1)$$



Sl. 2. Načelo triangulacijskega merjenja z uporabo anamorfnega objektivna
 Fig. 2. The principle of a triangulation-based measurement using an anamorph lens

in za koordinato x:

$$x = \left[\frac{L \cdot b_v}{\sin(\phi) \cdot \left(b_v + \frac{v}{\tan(\phi)} \right)} + (b_v - b_u) \right] \cdot \frac{u}{b_u} \quad (2)$$

and for coordinate x:

Pri tem pomenita člena v oklepaju oddaljenost točke T od prve optične ravnine ter razdaljo med prvo in drugo optično ravnino anamorfnega objektivna.

The parts in the square brackets represent, firstly, the distance between point T and the first principal plane, and, secondly, the distance between the first and the second principal plane of the anamorph lens.

1.2 Podtočkovna zaznava laserske črte

Digitalizirano sliko obravnavamo kot množico stolpcev, kjer je vsak stolpec prečni prerez skozi intenzitetni profil laserske črte. Tako predstavlja koordinata u indeks posameznega stolpca, koordinata v pa lego črte v posameznem stolpcu.

Zaznava laserske črte poteka z uporabo algoritma podtočkovne zaznave, pri čemer izrabimo poznavanje prečnega intenzitetnega profila črte, ki ga ponazorimo z Gaussovo funkcijo. Črta v posameznem stolpcu slike leži na mestu ničle prvega odvoda intenzitete signala, ki ga izračunamo kot konvolucijo med intenzitetnim signalom v posameznem stolpcu ter odvodom Gaussove funkcije:

1.2 Sub-pixel laser-line detection

We treat the digitized image as a number of columns, where each column represents the cross-section of a laser-stripe intensity profile. In this way the u coordinate represents the index of each column and the v coordinate represents the position of a stripe in each column.

Recognition of the laser stripe is based on sub-pixel line detection, where the intensity cross-section profile of a stripe is approximated by means of a Gaussian function. In this case the stripe in each column lies at the point where the first derivative of the intensity profile (also the signal) equals zero. The latter is calculated using a convolution between the intensity signal in each column and the first derivative of the Gaussian function:

$$I'_j = \sum_{k=-N_k}^{N_k} I_{j+k} \cdot K_k \quad (3),$$

pri čemer je K_k element konvolucijskega jedra, ki ima obliko prvega odvoda Gaussove funkcije:

where K_k is the element of the convolution kernel, which is expressed by means of the first derivative of the Gaussian function:

$$K_k = \frac{k}{s^3} \cdot e^{-\frac{k^2}{2s^2}} \quad (4),$$

N_k je polovična širina konvolucijskega jedra in s širina Gaussove funkcije, ki je približno enaka polovični širini laserske črte.

N_k stands for the half-width of the convolution kernel and s stands for the width of the Gaussian function, which is approximately equal to the laser-stripe half-width.

Ker je intenzitetni signal vzdolž stolpcev slike diskreten, izračunamo ničlo odvoda signala z linearno interpolacijo med sosednjima točkama, izmed katerih ima predhodna pozitivno, naslednja pa negativno vrednost.

Since the intensity signal along the column picture is discrete, the zero of the first derivative can be calculated using a linear interpolation between two neighboring points, where the former is positive and the latter is negative.

2 UMERITEV

2 CALIBRATION

Umeritveni postopek pomeni določitev relacije med KSS in SKS. Postopek obsega merjenje referenčnih točk ter izračun parametrov modela preslikave, ki matematično popisuje zgoraj omenjeno odvisnost. Seveda je najprej treba izbrati ustrezen model preslikave.

In the calibration procedure we determine the relationship between the ICS and the WCS. The procedure consists of a reference-point measurement and a calculation of the parameters of the transformation model, which mathematically describes the previously mentioned relationship. Of course, this model must be determined prior to the calibration.

2.1 Polinomski model preslikave

2.1 Polynomial model of transformation

Ker je lega SKS izbrana tako, da merjeni profil površine leži na ravnini $Y=0$, preslikava poteka med dvema dvorazsežnima koordinatnima sistemoma, ki ju opišemo s polinomskim modelom preslikave:

Since the position of the WCS is such that the measuring profile lies on the plane $Y=0$, the transformation goes between two two-dimensional coordinate systems, which we describe using a polynomial model of transformation:

$$x = \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} A_{j,i} \cdot u_f^i v_f^j \quad (5)$$

$$z = \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} B_{j,i} \cdot v_f^i u_f^j \quad (6).$$

Elementi $A_{j,i}$ in $B_{j,i}$ pomenijo utežne faktorje za posamezne člene polinomov. Zbrani so v tako imenovanih korekcijskih matrikah A in B. S prvimi členi obeh polinomov popravimo odmik in povečavo, s členi višjih redov pa popačitve objektiva ter nelinearnost triangulacijskega merjenja.

Elements $A_{j,i}$ and $B_{j,i}$ stand for the weights of each polynomial element. They are grouped in the so-called calibration matrixes A and B. The translation and magnification in each axis are adjusted using the first two elements, since lens distortions and nonlinearity related to the triangulation are corrected using higher-order elements.

Dobra lastnost tega modela se izkaže predvsem pri izračunu korekcijskih matrik, saj omogoča neposreden izračun. Tako lahko ob poznavanju koordinat referenčnih točk v SKS (X_{ref} in Z_{ref}) ter v KSS (U_{ref} in V_{ref}) izračunamo vrednosti elementov obeh matrik po metodi predločenega sistema linearnih enačb [7].

The advantage of this model is clearly demonstrated in the calculation of the calibration matrixes, because it enables a straightforward calculation. When the coordinates of the reference points in the WCS (X_{ref} and Z_{ref}) and the ICS (U_{ref} and V_{ref}) are known, the elements of the calibration matrixes are calculated by means of a singular-value decomposition [7].

2.2 Meritev in zaznava referenčnih točk

2.2 Measurement and detection of reference points

Referenčne točke izmerimo prek celotnega merilnega območja z uporabo umeritvenega etalona. Ta ima obliko poševne plošče z utori trikotnega

Reference points are measured over the entire measuring area using the calibration etalon. This has an inclined plate with linear grooves of a triangular

prereza vzdolž osi Y. Etalon med umerjanjem pritrdimo na pomično mizo, kakor je prikazano na sliki 3. Trikotni utori so namenjeni razpoznavi lege referenčnih točk v smeri X, spreminjanje višine referenčnih točk pa je doseženo s premikanjem etalona v smeri Y, in sicer po naslednji enačbi:

$$\Delta Z = \Delta Y \tan(\alpha) \quad (7)$$

Koordinate referenčnih točk v skupnem koordinatnem sistemu tako izračunamo:

$$X_{ref\ j-N_x+i} = \Delta X \cdot i - X_{offset} \quad (8)$$

$$Z_{ref\ j-N_x+i} = \Delta Z \cdot j - Z_{offset} \quad (9)$$

kjer je $i = 0 \dots N_x - 1$, $j = 0 \dots N_z - 1$, N_x je število utorov, ΔX je razmik med utori in N_z število izmerjenih profilov. Odmik SKS glede na prvo referenčno točko določujeta parametra X_{offset} in Z_{offset} .

Lege referenčnih točk v ICS določimo iz niza izmerjenih profilov umeritvenega etalona. Uporabljamo naslednji postopek:

- a) Določitev lege točk v smeri u je analogna zaznavi laserske črte v posameznem stolpcu slike: iz posnetih profilov izločimo lego zarez (U_{ref}) s postopkom podtočkovne zaznave na podlagi iskanja ničle prvega odvoda višine profila.
- b) Lego referenčnih točk v smeri u izračunamo kot povprečno višino profila v okolici posamezne točke, pri čemer zanemarimo območje zareze:

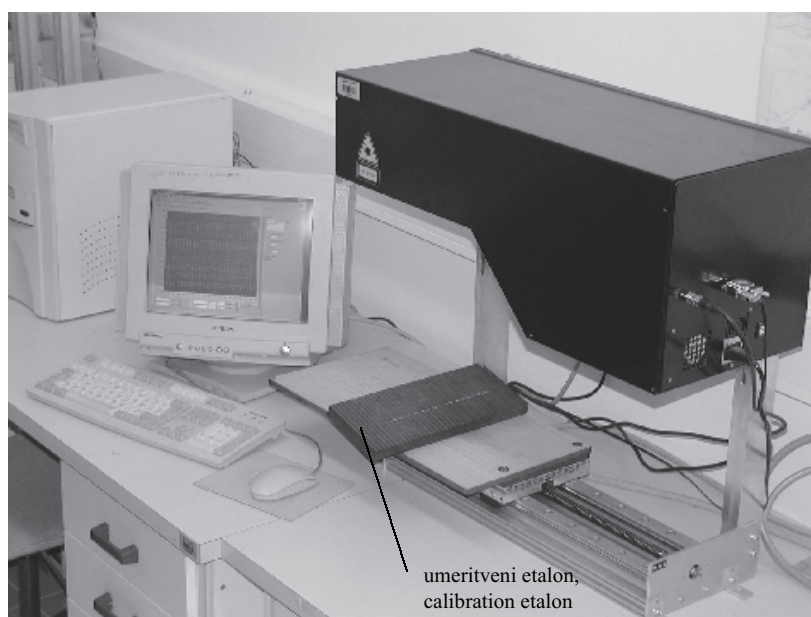
shape along the Y axis. The etalon is fixed on the translation stage as shown in Figure 3. The triangle-shaped grooves are used to detect reference points along the X axis, and the change of height of the reference points is achieved by moving the etalon along the Y axis:

The world coordinates of the reference points are calculated using the following equations:

where $i = 0 \dots N_x - 1$ and $j = 0 \dots N_z - 1$, N_x is the number of grooves, ΔX is the distance between the grooves and N_z is the number of measured profiles. The offset of the WCS with respect to the first reference point defines the parameters X_{offset} and Z_{offset} .

The positions of the reference points in the ICS are determined from a series of measured profiles of the calibrating etalon. We use the following procedure:

- a) Detection of the reference-point position along the u direction is analogous to the laser-stripe detection in each image column. In other words, the groove position (U_{ref}) is detected from measured profiles using sub-pixel detection based on zero searching of the first derivative of the measured profiles.
- b) The reference-point position along the u direction is calculated by means of the average profile height around each reference point, where the region of the groove is discarded:



Sl. 3. Umerjanje laserskega anamorfnega profilomera
Fig. 3. Calibration of a laser anamorph profilometer

$$V_{ref_i} = \frac{1}{2(N_{out} - N_{in})} \left[\sum_{k=-N_{out}}^{-N_{in}} V_{(U_{ref_i})+k} + \sum_{k=N_{in}}^{N_{out}} V_{(U_{ref_i})+k} \right] \quad (10).$$

Pri tem je N_{out} polovična širina okolice povprečenja, N_{in} polovična širina utora, $\langle U_{ref_i} \rangle$ pa je zaokrožena vrednost lege vrha zareze v smeri u .

where N_{out} stands for the half-width of the average neighborhood; N_{in} stands for the half-width of the groove and $\langle U_{ref_i} \rangle$ stands for the rounded value of the groove position along the u direction.

3 PREIZKUSI

V tem poglavju so predstavljeni preizkusi, ki smo jih izvedli z različnimi modeli LAP-ov. Meritve pokrivajo različna področja tehnike ter tudi različne potrebe po merilnih obsegih, vsem pa je skupno, da je ena izmera profila izrazito poudarjena v primerjavi z drugo. Zaradi tega je uporaba anamorfne preslikave primernejša od običajne - sferične, kar je razvidno tudi iz predstavljenih rezultatov.

3.1 Rezultati umerjanja

Rezultati umerjanja so prikazani za LAP z naslednjimi značilnostmi:

merilno območje:	200 × 20 mm (širina × višina),
ločljivost kamere:	360 × 288 točk,
velikost zaznavala CCD:	4,6 mm × 3,4 mm,
kot triangulacije:	$\phi = 45^\circ$
pomična miza:	ISERT, hod: 300 mm, korak: 0,01 mm,
osebni računalnik:	Pentium II/233MHz
Geometrijski parametri umeritvenega etalona so:	
nagib plošče:	$\alpha = 12,2^\circ$,
razmik med utori:	$\Delta X = 8,00$ mm,
širina utora:	$W_{utor} = 3,00$ mm,
globina utora:	$H_{utor} = 1,50$ mm,
material:	tekstolit.

Etalon smo v smeri Y premikali po $\Delta Y = 5,00$ mm, kar pomeni, da je razmik med izmerjenimi profili v navpični smeri $\Delta Z = 1,08$ mm (glej enačbo (7)). Izmerjenih profilov je bilo $N_x = 16$, na vsakem izmed njih pa je bilo upoštevanih $N_z = 25$ utorov. Slika 4 prikazuje izmerjene profile ter referenčne točke, ki so bile določene po zgoraj opisanem postopku. Zaradi optičnih napak, predvsem ukrivljenosti polja, je na robovih merilnega območja kakovost izmerjenih profilov slabša, zaradi česar sta prvi in zadnji utor vsakega profila izvzeta iz nadaljnega postopka.

V fazi izračuna korekcijskih matrik najprej določimo reda obeh. Reda matrike **A** 4×2 in matrike **B** 5×2 sta bila izbrana zaradi najmanjših standardnih odstopkov v posamezni smeri. Primerjava med izmerjenimi in pravimi legami referenčnih točk je prikazana na sliki 5. Že omenjeni standardni odstopki v smeri X znaša 0,076 mm in v smeri Z 0,028 mm. Tako je relativni standardni odstopki vzdolž smeri X približno 1/2600 merilnega območja, vzdolž smeri Z pa približno 1/700. Vidimo, da sta standardna

3 EXPERIMENTS

In this section we present the experiments that were made using different models of the LAP. The measurements cover different fields of the technique and also the different needs of measuring ranges, but they have a common property: that one dimension of the profile is much more stressed than the other one. Because of this, an anamorph lens is more suitable than a conventional lens, spherical, which is also evident from the results shown.

3.1 Calibration results

Calibration results are shown for the LAP with the following characteristics:

measuring range:	200 × 20 mm (width × height),
camera resolution:	360 × 288 pixels,
CCD dimension:	4.60 × 3.40 mm,
triangulation angle:	$\phi = 45^\circ$,
translation stage:	ISERT, travel: 300 mm, step: 0.01 mm,
personal computer:	Pentium II/233MHz.
Geometrical parameters of the calibration etalon are:	
plate inclination:	$\alpha = 12,2^\circ$,
distance between grooves:	$\Delta X = 8.00$ mm,
groove width:	$W_{utor} = 3.00$ mm,
groove depth:	$H_{utor} = 1.50$ mm,
material:	textolit.

The etalon was shifted along the Y direction by $\Delta Y = 5.00$ mm, which means that the distance between the measured profiles, ΔZ , is equal to 1.08 mm (see Eq. (7)). We examined 16 measured profiles (N_z) and 25 grooves (N_x) on each profile. Figure 4 shows the measured profiles and the reference points, which were detected according to the above procedure. The quality of the measured profiles near the image borders is somewhat poorer due to optical aberrations, especially because of field curvature, therefore the first and last groove of each measured profile were omitted from the subsequent procedure.

The first step in the calibration-matrix calculation is a determination of the matrix dimensions. The dimensions of 4×2 for matrix **A** and 5×2 for matrix **B** were chosen as optimum sizes because of the minimum achieved standard deviations in each separate direction. Figure 5 shows a comparison between the measured and the actual positions of the reference points. The standard deviations amount to 0.076 mm along the X direction and 0.028 mm along the Z direction. So, the relative standard deviation along the X direction amounts to approximately 1/2600 of the measurement range, and approximately 1/700 along the

odstopka daleč manjša od ločljivosti zaznavnega elementa (360×288), kar kaže na natančnost umeritvenega postopka.

3.2 Nadzor profila gumijastega traku

Izvlačen gumijast trak se uporablja za izdelavo avtomobilskih plaščev in želja naročnika je bila razvoj sistema za sproten nadzor profila traku ter zanj krmiljenje orodja, s čimer bi dosegli večjo kakovost izdelkov ter zmanjšali proizvodne stroške zaradi zmanjšanja izmeta in zaustavljanja proizvodnje.

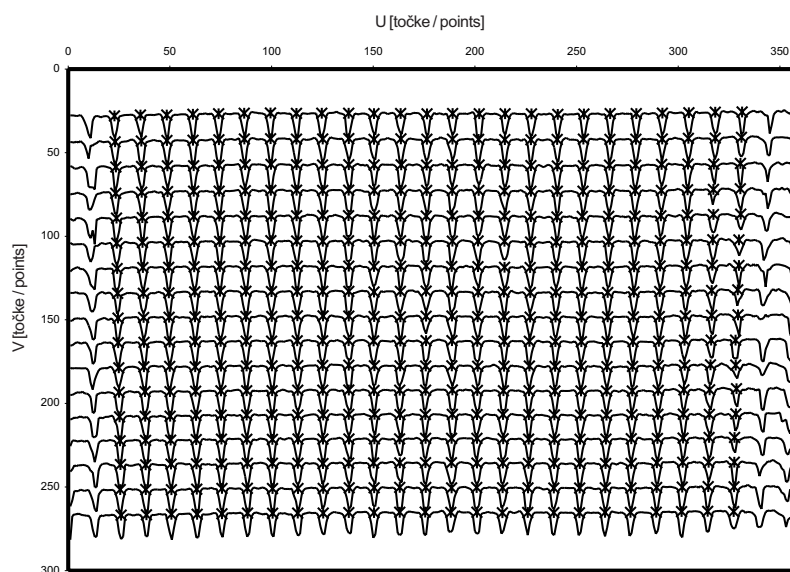
Profilometer ima značilnosti, kakršne so navedene v prejšnjem poglavju. Optika je prilagojena

Z direction. We see that both standard deviations are much smaller than the camera resolution (360×288), which shows in the exactness of the calibration procedure.

3.2 Inspection of the extruded rubber-band profile

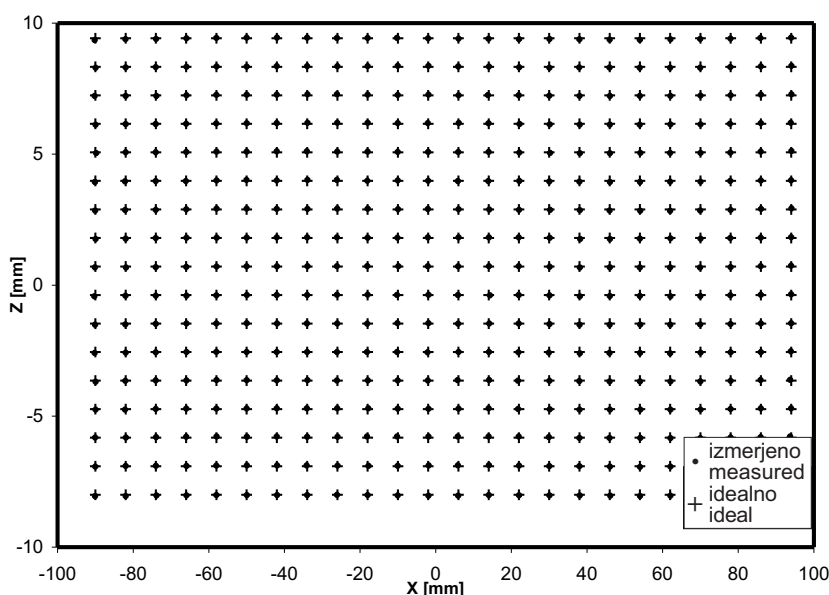
The extruded rubber band is used in the tire manufacturing process and the manufacturer's needs were to develop a system with real-time inspection of the extruded band profile. With such feedback control of the extruder, better production quality and lower production costs are ensured as a result of reduced levels of waste and uninterrupted production.

The profilometer has the same characteristics as those listed in the previous section. The optics



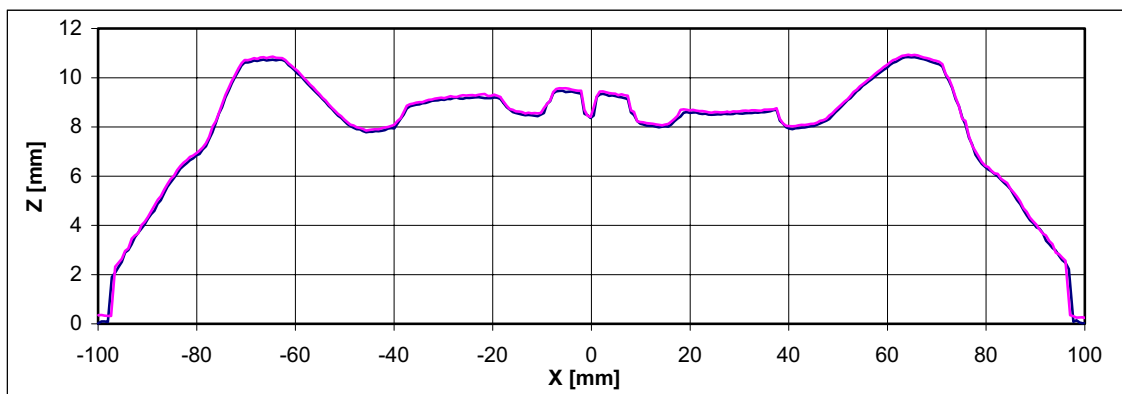
Sl. 4. Izmerjeni profili umeritvenega etalona ter referenčne točke (×)

Fig. 4. Measured profiles of the calibration etalon and the detected reference points (×)

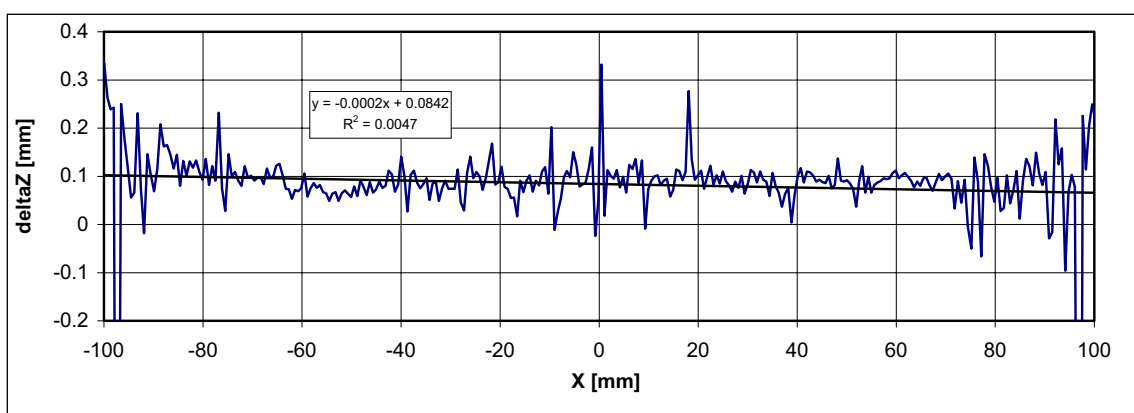


Sl. 5. Primerjava med izmerjenimi in idealnimi referenčnimi točkami

Fig. 5. Comparison between the measured and the ideal reference points



Sl. 6. Profila izvlečenega gumijastega traku. Pred drugo meritvijo je bil trak podložen s tankim papirjem.
Fig. 6. Two profiles of an extruded rubber band. The band was lined with a sheet of paper, before the second measurement.



Sl. 7. Razlika med profiloma gumijastega traku, ki sta prikazana na sliki 6.
Fig. 7. Difference between the two profiles that are shown in figure 6.

gabaritom prereza izvlečenega traku (širina in višina), ki se gibljejo od 150×13 mm (širina \times višina) do 200×18 mm. Temu primerno je tudi merilno območje inštrumenta, ki znaša 200×20 mm.

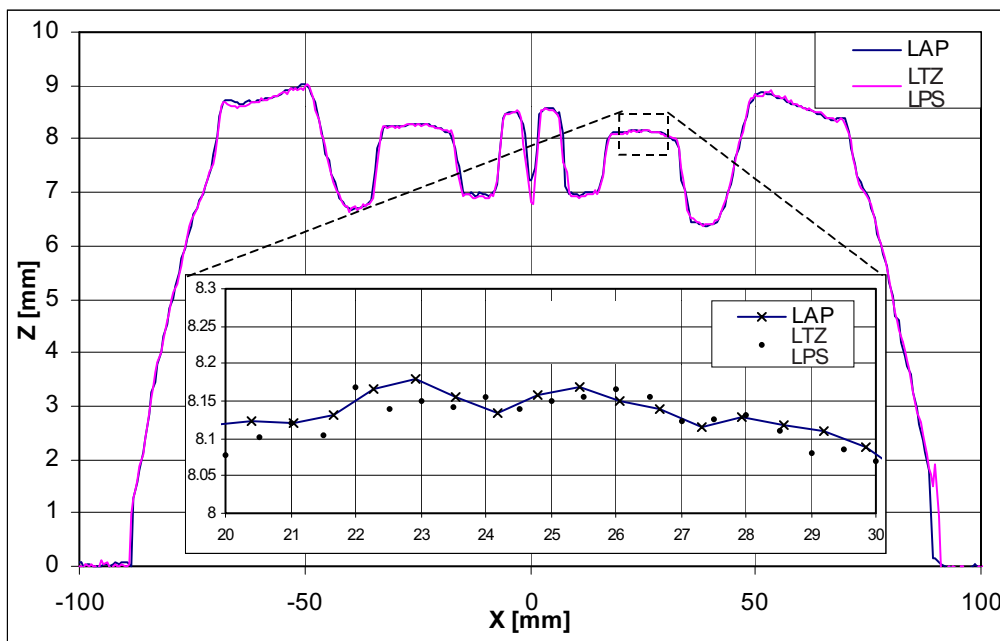
Na sliki 6 sta prikazana dva prečna profila istega traku, ki je enkrat dvignjen za debelino lista papirja ($\sim 0,1$ mm). Slika 7 prikazuje razliko izmerjenih višin vzdolž profilov. V idealnem primeru bi morala razlika biti v vseh točkah enaka, vendar zaradi različnih motilnih vplivov temu ni tako. Do največjih odstopanj prihaja na robovih merilnega območja zaradi že omenjenih optičnih nepopolnosti objektiv. Precejšnji odstopki so tudi na mestih velikega nagiba profila, pri čemer gre vzrok iskati predvsem v slabši vidljivosti teh področij. Kljub vsem omenjenim nepopolnostim je iz zgornjih dveh grafov razvidno, da je ločljivost profilomera na dejanskih objektih manjša od 0,1 mm.

Majhno merilno negotovost in kakovosten umeritveni postopek potrjuje tudi vzporedno opravljena meritev profila izvlečenega gumijastega traku s trgovskim točkovnim triangulacijskim zaznavalom. Uporabili smo zaznavalo proizvajalca MEL - Mikroelektronik GmbH. Zaznavalo z oznako

are adapted to the dimensions of the extruded band section, which ranges from 150×13 mm (width \times height) to 200×18 mm, so the measuring range of the instrument equals 200×20 mm.

Figure 6 shows two profiles of the same rubber band, first in its neutral position and then in a slightly lifted position ($\sim 0,1$ mm). Figure 7 shows the height difference along these two profiles. In the case of an ideal measurement the difference would be constant over the entire length; however, due to various disturbing impacts the real difference is not constant. The largest deviations occur at the edges of the measuring range due to the already mentioned optical imperfections of the lens. Considerable deviations also exist in places where the profile is very steep, because of the poorer visibility in these places. In spite of all these imperfections, it is evident from the above figures that the profiler's resolution on a real object is less than 0.1 mm.

A small measurement uncertainty and a successful calibration method were also confirmed by the measurement of the same band cross-section using a commercial point-triangulation sensor. The manufacturer of this sensor is MEL - Mikroelektronik gmbh, the sensor type is M5L/10, the measuring range



Sl. 8. Profil izvlečenega gumijastega traku, izmerjenega z laserskim anamorfnim profilometerom (LAP) ter laserskim točkovnim zaznavalom (LTZ)

Fig. 8. Profile of the extruded rubber band, measured first with a laser anamorph profilometer (LAP) and second with a laser-point sensor (LPS)

M5L/10 ima merilno območje $\pm 5,0$ mm, napaka linearnosti znaša $30 \mu\text{m}$ in naključni odstopok $3 \mu\text{m}$ [8]. Izmerjenih je bilo 400 točk vzdolž profila, kar je približno enako prečni ločljivosti profilometra. Na sliki 8 je razvidno dobro ujemanje obeh izmerjenih profilov. Iz povečave na sliki 8 je razvidno, da je velikost odstopkov primerljiva pri obeh meritvah. To pomeni, da na dejanskem vzorcu dosegamo enako merilno negotovost, kakršno ima trgovsko točkovno zaznavalo, vendar ob mnogo krajšem času meritve. V primeru točkovnega senzorja je čas znašal približno 3 minute, v primeru profilometra pa $\sim 0,5$ sekunde!

Tako lahko rečemo, da sistem izpolnjuje prvotno zastavljen cilj tako glede natančnosti kakor tudi hitrosti merjenja.

3.3 Nadzor postopka laserskega odstranjevanja barve

Dandanes znaša letna svetovna potreba po čiščenju barvanih ali oksidiranih površin nekaj sto milijonov kvadratnih metrov. Sem spadajo površine letal, ladij in drugih konstrukcij [9]. Temu primerno dejaven je tudi razvoj novih tehnologij čiščenja, kjer se poleg običajnih postopkov, med drugim vedno bolj uveljavlja lasersko čiščenje. Ta tehnika ima pred običajnimi postopki vrsto prednosti, izmed katerih sta najpomembnejši selektivno odstranjevanje materiala (vrsta in lokacija) ter ekološka neoporečnost postopka ([9] in [10]).

Z namenom optimiranja parametrov ter izvedbe nadzora postopka laserskega odstranjevanja barvnih oziroma oksidnih plasti potekajo v

is ± 5.0 mm, the nonlinearity error equals $30 \mu\text{m}$ and the resolution (noise level) equals $3 \mu\text{m}$ [8]. The profile was measured at 400 points, which is approximately equal to the transverse resolution of our profilometer. Figure 8 shows that both profiles fit very well. It is clear from the magnification on Figure 8 that the deviations of both measurements are of the same order. This means that the profilometer has the same measurement uncertainty on a real object as the above commercial point sensor has. But the time for measuring the profile using the point sensor was ~ 3 minutes, whereas with the profilometer this time was only ~ 0.5 seconds!

It is clear that the system fulfills the requirements as far as accuracy and measuring speed are concerned.

3.3 Monitoring of the laser-based decoating process

Nowadays, worldwide decoating needs are enormous: each year several hundred million square meters of surfaces have to be stripped. These surfaces mainly belong to airplanes, boats and other constructions [9]. As a result there are a lot of new stripping techniques being developed. Besides conventional methods, laser-based decoating processes have been gaining wide acceptance in recent years. These processes have many advantages, among which the most important are selectivity (material and location) and reduced environmental impact ([9] and [10]).

To optimize the parameters and monitor the laser-based decoating of colored layers, research in this field is taking place in the Group for

Laboratoriju katedre za optodinamiko in lasersko tehniko raziskave na tem področju [11]. Eksperimentalna postavitve (sl. 9) omogoča sprotne merjenje optodinamskih signalov (v nadaljevanju OD) vzbujenih ne le v podlagi, ampak tudi v okoliškem zraku, hkrati pa omogoča tudi merjenje geometrijske oblike nastajajočega kraterja po vsakokratnem laserskem blisku. Naloga te študije je v prvi fazi poiskati povezavi med značilkami OD signalov in količino odvzetega materiala ter značilkami OD signalov in zaustavitvijo odstranjevanja. V ta namen smo med drugim razvili laserski anamorfni profilomer z ustreznimi značilnostmi, ki je namenjen kot referenčni merilnik geometrijske oblike nastajajočega kraterja.

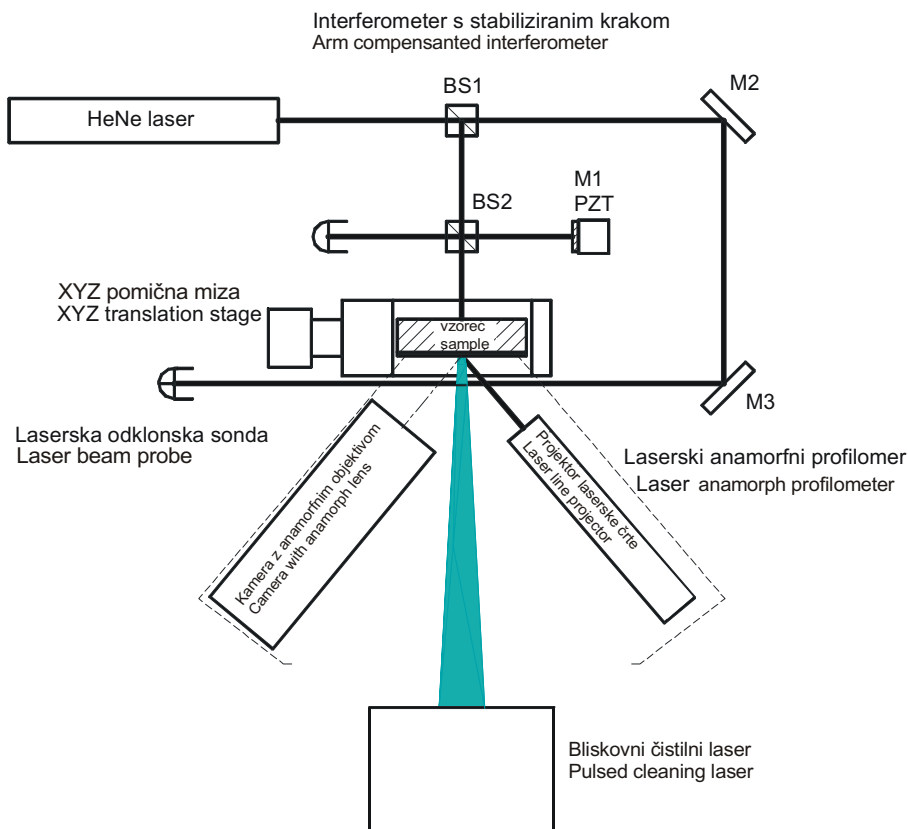
Geometrijska oblika omenjenega kraterja je izmerjena po vsakokratnem laserskem blisku. Pomik prečno na merjeni profil, tako imenovano snemanje (skaniranje), je zagotovljeno z računalniško krmiljeno mikropozicionirno mizico za premikanje obdelovanca. Anamorfni objektiv in laserski projektor sta zasnovana tako, da merilno območje LAP znaša $20 \times 3 \times 25$ mm (širina \times višina \times gib mizice). Za snemanje laserske črte smo uporabili digitalno kamero CCD ADIMEC 12XP z ločljivostjo 1024×1024 točk, izmerami zaznavnega elementa 10×10 mm ter dinamičnim obsegom 12 bit.

Slika 10 prikazuje potek odstranjevanja plasti barve prek sredine kraterja. Lepo je razvidno enakomerno naraščanje globine prek celotnega števila bliskov vse do konca odstranjevanja. Zanimivo je,

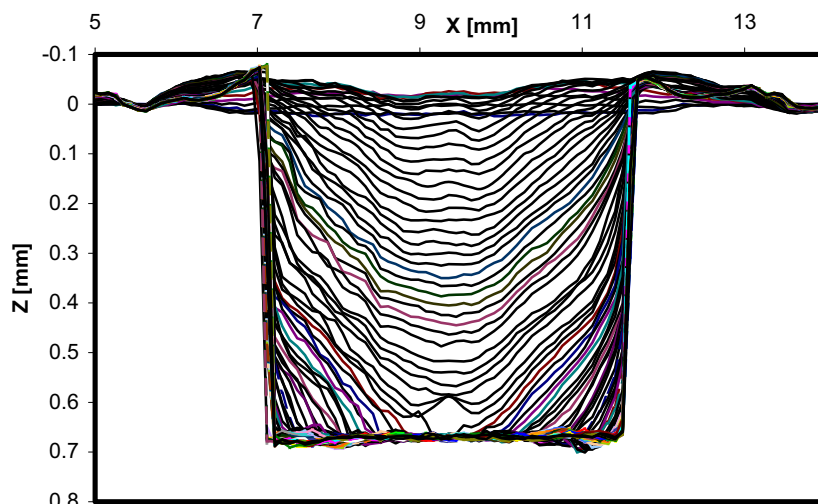
Optodynamics and Laser Applications [11]. The experimental setup that is shown in Figure 9 enables a real-time measurement of optodynamic signals (ODs), which are induced not only in the substrate but also in the surrounding air; and it also enables geometry measurements of the growing crater after each laser pulse. The aim of this study was to find two kinds of correlations: first, between the significant features of the optoacoustic signal and the amount of ablated coating; and second, between the significant features of the optoacoustic signal and the termination of the cleaning process. A laser anamorph profiler with appropriate characteristics was developed specifically for a reference measurement of the geometry of the growing crater.

The geometry of the crater is measured after each laser pulse. Movement across the crater area, known as scanning, is possible due to a computer-controlled micro-positioned translating stage. The anamorph lens and the laser projector are designed to achieve a measuring range of $20 \times 3 \times 25$ mm (width \times height \times stage travel). The ADIMEC 12XP digital CCD camera has a 1024×1024 pixel resolution, a 10×10 mm CCD dimension and a 12-bit dynamic range.

Figure 10 shows the progress of the colored layer decoating through the middle plane of the crater. Constant linear deepening is clearly visible over the entire process. It is interesting that at the beginning

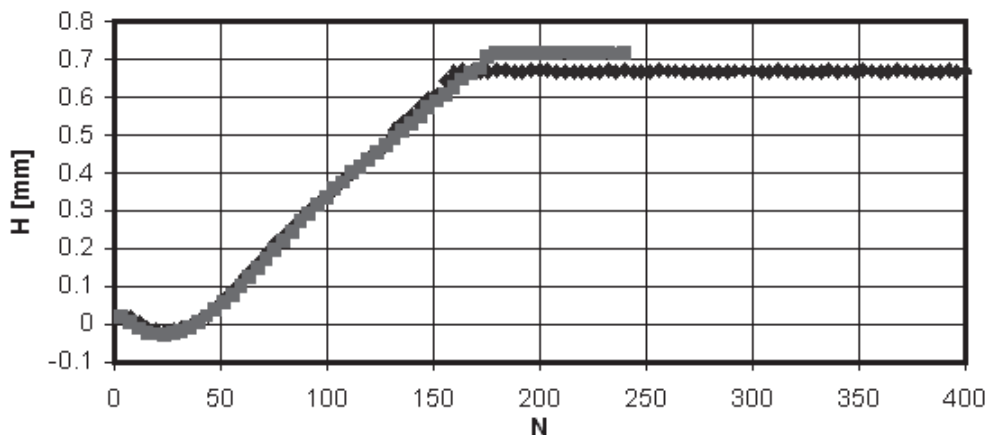


Sl. 9. Shema merilne verige za nadzor postopka laserskega čiščenja
 Fig. 9. Experimental setup for monitoring the laser decoating process



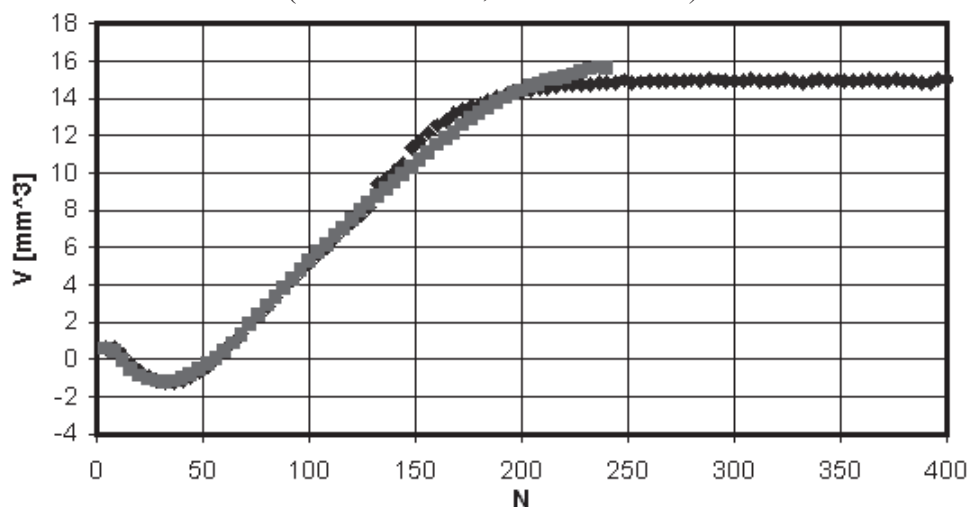
Sl. 10. Napredovanje odstranjevanja plasti barve med postopkom laserskega čiščenja
Prikazani so srednji profili kraterja po vsakem četrtem laserskem blisku.

Fig. 10. Progress of colored-layer decoating during the laser cleaning process. The figure shows the middle profile of the crater after every fourth laser pulse.



Sl. 11. Naraščanje globine kraterja v odvisnosti od števila bliskov med laserskim odstranjevanjem plasti barve (♦ meritev 1, ■ meritev 2)

Fig. 11. Increase in the depth of the crater with the number of laser pulses during laser decoating (♦ measurement 1, ■ measurement 2)



Sl. 12. Naraščanje prostornine odstranjene barve v odvisnosti od števila bliskov med laserskim odstranjevanjem plasti barve (♦ meritev 1, ■ meritev 2)

Fig. 12. Increase in the volume of the crater with the number of laser pulses during laser decoating (♦ measurement 1, ■ measurement 2)

da na začetku postopka površina rahlo nabrekne, kar pripisujemo spreminjanju kemične sestave barvne plasti. Začetno nabrekanje in nadaljnje enakomerno odstranjevanje barve je razvidno tudi iz diagramov na slikah 11 in 12, ki prikazujeta večanje globine kraterja in prostornine odstranjene plasti barve v odvisnosti od števila laserskih bliskov. Diagrama prikazujeta dve meritvi na enakem vzorcu barve. Razvidna je dobra ponovljivost postopka tako z vidika hitrosti odstranjevanja kakor tudi z vidika začetnega nabrekanja. Različni končni globini kraterja pa nista posledici merilne negotovosti, ampak neenakih debelin barvnih plasti.

4 SKLEPI

V prispevku opisujemo delovanje in razvoj laserskih anamorfni profilometerov ter dva primera uporabe, pri katerih se izkaže anamorfna profilometrija primernejša od običajne krogelne. Poseben pomen pripisujemo inovativni metodi umerjanja. Namesto fotogrametričnega modela vpeljemo polinomski model preslikave, katerega parametri so v obliki korekcijskih matrik preprosto izračunljivi. Odmik in povečavo uravnava prva dva člena, nelinearnosti zaradi optične popačitve ter triangulacije pa višji členi omenjenih matrik. Prav tako izviren je postopek merjenja referenčnih točk. Umeritveni etalon ima obliko poševne plošče z vzdolžnimi utori trikotnega prereza. S preprosto reliefno površino, ki je ni težko natančno izdelati, je dosežena natančna določitev lege referenčnih točk v vodoravni in navpični smeri. Vse naštetu prispeva k preprosti in čvrsti izvedbi umeritvenega postopka, zaradi česar ga je mogoče hitro izvesti po vsakem poseganju v geometrijsko obliko merilnika.

Primeri uporabe v prvi vrsti dokazujeta uporabnost laserske anamorfne profilometrije na različnih področjih tehnike ter tudi različne potrebe po merilnih obsegih. V obeh primerih je ena izmera merilnega obsega izrazito poudarjena v primerjavi z drugo. Zaradi tega je uporaba anamorfne preslikave primernejša od običajne sferične, kar je razvidno tudi iz predstavljenih rezultatov.

of the process the surface swells slightly, which we attribute to chemical changes in the colored layer. The initial swelling and the subsequent linear deepening can also be seen on the graphs in Figures 11 and 12, which show the increase of the crater depth and the volume of removed color with respect to the number of laser pulses. Two measurements of the two craters are shown on the same color layer. It is evident that the repeatability of the process is good, which goes not only for the decoating rate but also for the initial swelling of the surface. The different final crater depths are not a consequence of the measurement uncertainty, but of the unequal thickness of the colored layer.

4 CONCLUSIONS

In this paper we describe the principles and development of laser anamorph profilometers. We give particular emphasis to the novel calibration method. We introduce a polynomial model of the transformation instead of the photogrametry model, which enables us to compute the model parameters (the so-called calibration matrixes) more easily by means of linear algebra. The translation and magnification in each optical axis are adjusted using the first two elements, since lens distortions and nonlinearity related to triangulation are corrected by the use of higher-order elements of the matrixes. The measurement of the reference points is also original, since the calibration etalon has an inclined surface with linear grooves of triangular shape along the Y axis. An accurate determination of the reference-point positions is achieved with simple etalon relief, which is easy to make. All these factors contribute to a simple and robust realization of a calibration procedure. Because of this the procedure can be conducted at any time, especially after each change of profilometer geometry.

Both experiments demonstrate the applicability of laser anamorph profilometry in different fields of the technique, where one dimension is much more emphasised than the other one. Because of this, an anamorph lens is more suitable than a conventional, spherical one.

5 LITERATURA 5 REFERENCES

- [1] Donges, A., R. Noll (1993) *Lasermesstechnik : Grundlagen und Anwendungen*, Hüthig, Heidelberg.
- [2] Jezeršek, M. (1998) Laserski merilnik profila z anamorfno optiko (Laser profile measurement system with anamorph optics), Prešernove nagrade / Univerza v Ljubljani, Ljubljana.
- [3] Blais, F., J. Angelo Beraldin (1997) Calibration of an Anamorphic Laser Based 3-D Range Sensor, *SPIE Proceedings*, Videometrics V, San-Diego, Volume 3174.
- [4] McIvor, A.M. (2002) Nonlinear calibration of a laser stripe profiler, *Optical Engineering*, Volume 41, 205-212.
- [5] Tiddeman, B, N. Duffy, G. Rabey, J. Lokier (1998) Laser-video scanner calibration without the use of frame store, *IEE Proceedings*, Vision Image and Signal Processing, Volume 145, 244-248.

- [6] Jain R., R. Kasturi, B. G. Schunck (1995) Machine vision, *McGraw-Hill*.
- [7] Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flanery (1992) Numerical recipes in C, *Cambridge University Press*.
- [8] MEL Mikroelektronik GmbH, *Intelligent Sensors & Measuring Systemes*, Eching, www.MELsensor.com.
- [9] Fecsik, P.W., F. A. Lancaster (2000) Laser-based paint decoating process, *Metal Finishing*, Vol. 98, 10-14.
- [10] Lovoi et al. (1986) Method of and apparatus for the removal of paint and the like from a substrate, *United States Patent*, 4,588,885.
- [11] Milanič, M., M. Jezeršek, A. Babnik, J. Možina, Optodinamsko spremljanje procesa odstranjevanja barve v realnem času, v pripravi.

Naslov avtorjev: Matija Jezeršek
prof.dr. Janez Možina
Fakulteta za strojništvo
Univerza v Ljubljani
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
matija.jezersek@fs.uni-lj.si
janez.mozina@fs.uni-lj.si

Authors' Address: Matija Jezeršek
Prof.Dr. Janez Možina
Faculty of Mechanical Eng.
University of Ljubljana
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana, Slovenia
matija.jezersek@fs.uni-lj.si
janez.mozina@fs.uni-lj.si

Prejeto: 6.12.2002
Received:

Sprejeto: 29.5.2003
Accepted:

Odprt za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Ekperimentalno preskušanje prenosa toplote v Lorenzovem postopku z uporabo zeotropnih zmesi

Experimental Testing of the Heat Transfer in a Lorenz Process Using Zeotropic Mixtures

Vladimir Soldo · Tonko Čurko · Vlasta Zanki

Za sistem, ki deluje pri enakih pogojih je bila opravljena primerjava med termodinamičnim izkoristkom za enokomponentno hladivo R22 ter za njegovo zamenjavo z zeotropno zmesjo R407C. Predstavljena je konstrukcija hladilnega sistema, ki omogoča delovanje z R22 ter R407C, skupaj z meritvami vseh ustreznih podatkov (temperatura, tlak in pretok), njihovim zapisom ter analizo.

Dobljeni rezultati kažejo, da je hladivo R407C dobra zamenjava za R22 pri višjih temperaturah uparjanja. Čeprav so teoretični rezultati vodili k predpostavki, da bo R407C v primerjavi z R22 povečal izkoristek, tega eksperimentalni rezultati niso potrdili. Razlog za to dejstvo je v nižjih toplotnih prestopnostih v primeru uporabe hladiva R407C.

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: zmesi zeotropske, procesi Lorentz, izkoristki termodinamični, prenos toplote)

A comparison has been made between the thermodynamic efficiency of a single-component refrigerant R22 and a substitute zeotropic mixture R407C in a system operating under the same conditions. The construction of a refrigerating system that uses R22 and R407C is presented, along with measurements of all the relevant data (temperature, pressure and flow rate), their acquisition, and their analysis.

Our results show that the refrigerant R407C is a good substitute for the refrigerant R22 at higher evaporation temperatures. Although the theoretical results suggest that R407C will increase efficiency compared to R22, the experimental results did not confirm it. This because in the process with the refrigerant R407C the heat-transfer coefficients are lower.

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: zeotropic mixtures, Lorentz process, thermodynamic efficiency, heat transfer)

1 DEFINICIJA PROBLEMA

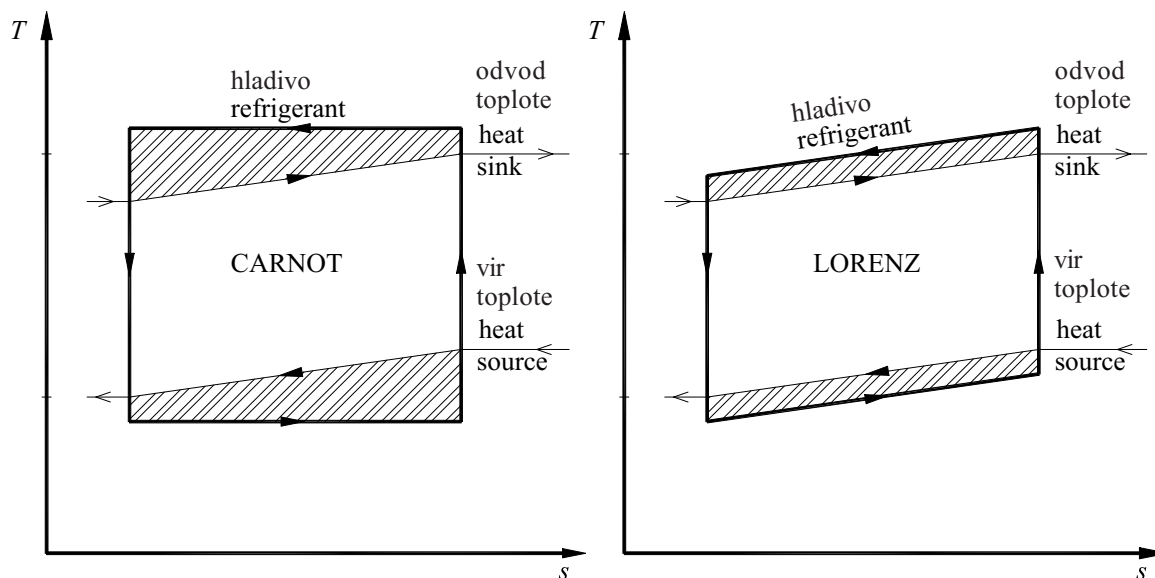
Teoretične in eksperimentalne študije so pokazale, da lahko termodinamični izkoristek hladilnega sistema izboljšamo z uporabo zeotropnih zmesi [1]. Zeotropne zmesi so uporabljene tako, da se povečanje temperature med uparjanjem ujema s hlajenim sredstvom, oziroma da se zmanjšanje temperature pri kondenzaciji ujema s temperaturo okolice in tako omogočajo Lorenzov postopek. Torej glede na Lorenzov postopek je tu največja prednost hladilnega postopka (celo večja kakor pri Carnotovem postopku) ta, da se ta postopek najbolj učinkovito prilagaja temperaturnim spremembam hlajenega sredstva ali okolice.

Slika 1 daje kakovostno predstavbo Carnotovega in Lorenzovega procesa pri enakih

1 PROBLEM DEVELOPMENT

Theoretical and experimental studies have shown that the thermodynamic efficiency of a refrigerating system can be improved by using a zeotropic mixture [1]. Zeotropic mixtures are used in such a way that the temperature increase during evaporation coordinates with the cooled medium, while at the same time the temperature decrease of the condensation coordinates with the temperature medium of the environment, and in this way the Lorenz process is enabled. According to Lorenz, the most advantageous refrigerating process, even more advantageous than Carnot's process, would be the one that is the most effectively adapted to the temperature changes of the cooled medium, or to the medium of the environment.

Figure 1 gives a qualitative presentation of the Carnot and Lorenz processes for the same



Sl. 1. Kakovostna primerjava Carnotovega in Lorenzovega postopka v diagramu T-s
Fig. 1. Qualitative comparison of the Carnot and Lorenz processes, presented on T-s diagrams

temperaturah toplotnega vira in ponora. Šrafirana površina predstavlja izgubo eksergije v prenosnikih toplote. Če gledamo sliki, je očitno, da bo Lorenzov postopek termodinamično bolj učinkovit, toda pod pogojem, da prenos toplote poteka v protitočnih prenosnikih toplote z majhno temperaturno razliko.

2 EKSPERIMENTALNA OPREMA IN MERITVE

Slika 2 opisuje eksperimentalno opremo s hladilnim sistemom, ki omogoča obratovanje sistema po Lorenzovem (uporaba zeotropne zmesi) ter Carnotovem postopku (uporaba azeotropne zmesi ter čistega hladiva). Osnovni elementi sistema so polzaprti batni kompresor, protitočni uparjalnik cev v cevi, kondenzator in termoekspanzijski ventil. Sistem je opremljen z inštrumenti in zaznavala, ki merijo vse ustrezne parametre (temperatura, tlak in pretok) in so povezani z zapisovalnikom podatkov ter analizatorjem ([2] in [3]).

3 ANALIZA REZULTATOV MERITEV

Opravljena je bila primerjava rezultatov meritev med postopkom s čistim hladivom R22 in med postopkom z zeotropno zmesjo R407C.

Preskus na hladilnem sistemu sestoji iz meritev temperature na vstopu in izstopu hladiva iz prenosnika, hladiva in hladilne vode, meritev pretoka v primarni zanki in v obeh sekundarnih zankah, tlaka uparjanja in kondenzacije ter električne moči motorja kompresorja.

Izmerjene temperature, tlaki in vrednosti pretokov so obdelani s programom LabVIEW, ki uporablja kot vir program bazo podatkov REFPROP ([4] in [5]) za izračun termodinamičnih in fizikalnih

temperature of heat source and heat sink. The hatched surface represents the exergy loss on the heat exchangers. It is obvious from the figures that the Lorenz process will be thermodynamically more efficient, but on condition that the heat transfer takes place in counter-flow heat exchangers with a small driving temperature difference.

2 EXPERIMENTAL RIG AND MEASUREMENTS

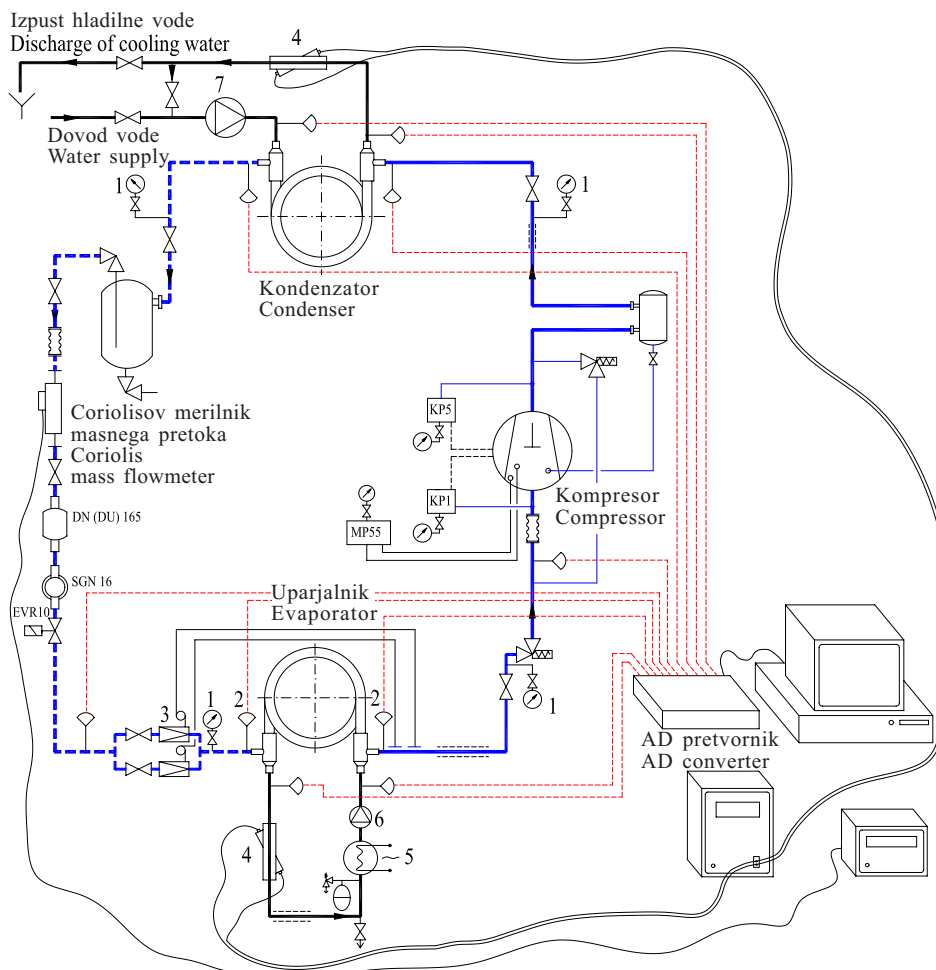
Figure 2 is a schematic diagram of the experimental rig with a refrigerating system that can operate according to the Lorenz (zeotropic mixture application) and Carnot (application of azeotropic mixture and pure refrigerant) processes. The basic system elements are a semi-hermetic reciprocating compressor, a counterflow tube-in-tube evaporator, a condenser and a thermoexpansion valve. The system is equipped with instruments and sensors that measure all the relevant data (temperature, pressure and flow rate), and is connected to a data-acquisition and analysis system ([2] and [3]).

3 ANALYSIS OF THE MEASUREMENT RESULTS

A comparison between the process with the pure refrigerant R22 and the process with the zeotropic mixture R470C was carried out.

The experiment on the refrigerating system consists of temperature measurements, at the exchanger inlets and outlets, of the refrigerant, the coolant and cooling water, flow measurements in the primary loop and in both secondary loops, evaporation and condensation pressure and the electric power of the compressor motor.

The measured temperature, pressure and flow values are processed using the LabVIEW program, which uses the source program REFPROP databank ([4] and [5]) for the refrigerant's thermodynamic and



- | | |
|--|---|
| 1 – tlačno zaznavalo | 1 – pressure transducer |
| 2 – termopar Cu-Ko, tip T | 2 – thermocouples Cu-Ko, T-type |
| 3 – termoekspanzijski ventil TEX2-04 (03) | 3 – thermoexpansion valve TEX2-04 (03) |
| 4 – prostominski merilnik pretoka etilen - glikola (hladilne vode) | 4 – volumetric flowmeter of ethylene-glycol (cooling water) |
| 5 – električni grelnik El-Cm, 2-15 kW | 5 – electric heater El-Cm, 2-15 kW |
| 6 – črpalka hladilnega sredstva etilen – glikol | 6 – pump of coolant ethylene-glycol |
| 7 – elektronska črpalka hladilne vode | 7 – electronic pump of cooling water |

Sl. 2. Shema eksperimentalne naprave
Fig. 2. Schematic diagram of the experimental rig

Preglednica 1. Natančnost zaznaval in parametrov
Table 1. Accuracy of the sensors and parameters

Zaznavala Sensors	Parametri Parameters		
temperatura temperature	0.3 °C	spособnost, toplotni tok capacity, heat flux	± 0.32 %
absolutni tlak absolute pressure	± 0.2 f.s.	ϵ COP	± 0.91 %
pretok hladiva refrigerant flow rate	± 0.2 %	srednja logaritemska temperaturna razlika log mean-temperature difference	± 4.63 %
moč elektromotorja power of electrical motor	± 1.5 %	koeficient prenosa toplote heat-transfer coefficient	± 9.76 %

lastnosti hladiva in daje kot rezultat hladilno moč Φ_0 in grelno moč Φ_C za obe hladivi.

3.1 Celotni izkoristek

Med hladilno sposobnostjo hladiv R22 in R407C pri visokih temperaturah uparjanja (sl. 3) ni nobenih razlik. Ko so temperature uparjanja nižje, je hladilna sposobnost pri R22 večja kakor pri R407C.

Moč kompresorja, ki obratuje z R407C, je do 3 odstotke večja kakor pri R22 (sl. 4).

Razlogi za zmanjšanje celotnega izkoristka (hladilne sposobnosti ter moči kompresorja) postopka s hladivom R407C so nižji koeficienti

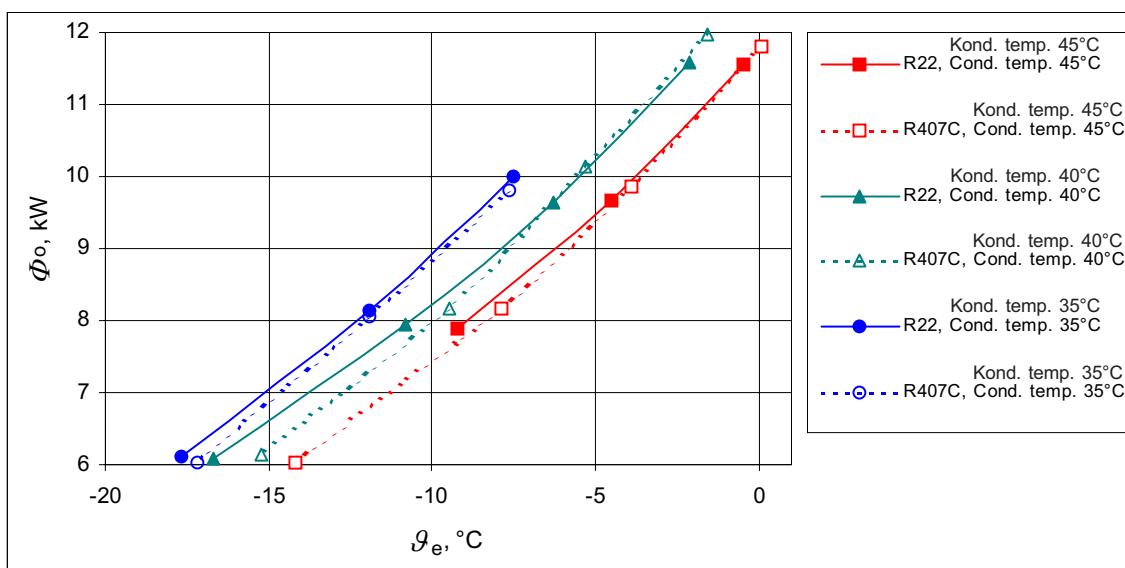
physical properties calculation, and obtains the results of the cooling capacity Φ_0 and the heating capacity Φ_C for both refrigerants.

3.1 Overall performance

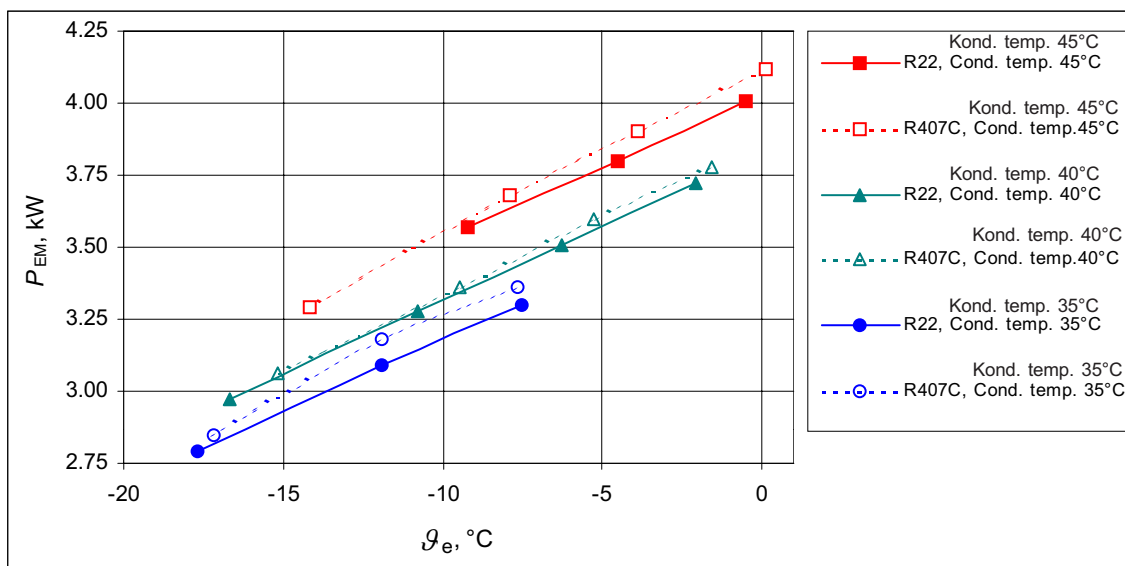
There is no difference between the cooling capacity for the refrigerants R22 and R407C at high evaporation temperatures (Fig. 3). For lower evaporation temperatures the cooling capacity of R22 is higher than that of R407C.

The compressor's operating power with R407C is up to 3 % higher than with R22 (Fig. 4).

The reasons for the degradation of the overall performance (cooling capacity and compressor power) in the process with refrigerant R407C are lower



Sl. 3. Hladilna moč Φ_0 kot funkcija temperature uparjanja \mathcal{G}_e
Fig. 3. Cooling capacity Φ_0 as a function of the evaporation temperature \mathcal{G}_e



Sl. 4. Moč kompresorja P_{EM} kot funkcija temperature uparjanja \mathcal{G}_e
Fig. 4. Compressor power P_{EM} as a function of the evaporation temperature \mathcal{G}_e

prenosa toplote (glej pogl. 3.2) kakor pri R22. Zmanjšanje koeficienta prenosa toplote pri delovanju z R407C se pojavi zaradi razstavitve zeotropne zmesi, različnih topljivosti komponent in mazalnega olja ter spremembe lastnosti med uparjanjem in kondenzacijo (glej pogl. 4).

Hladilno število (COP - ε) je definirano v razmerju z močjo električnega motorja P_{EM} , ki poganja kompresor.

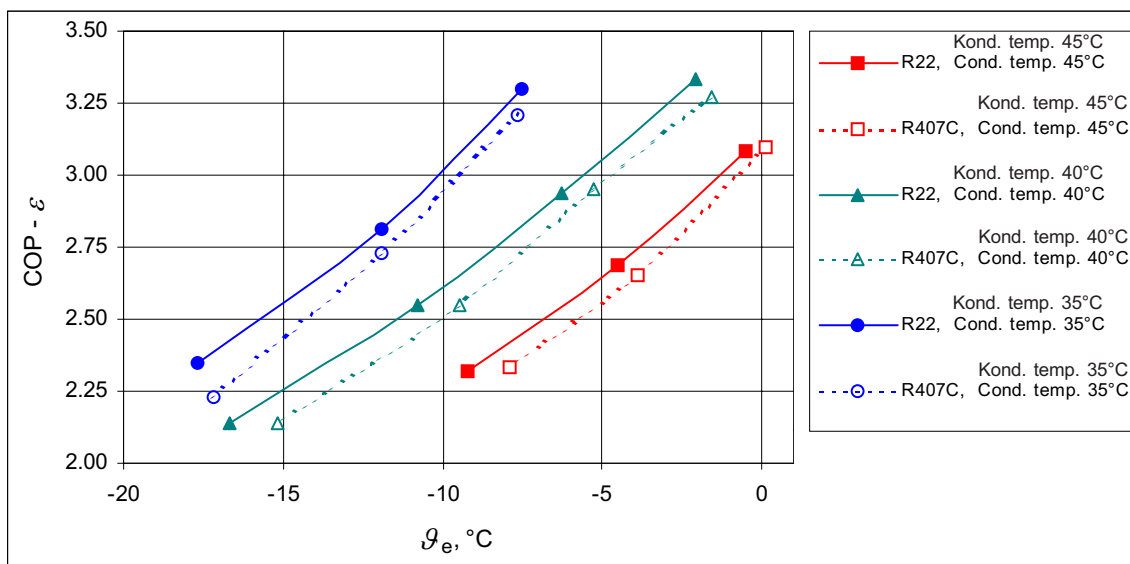
$$\varepsilon = \frac{\Phi_c}{P_{EM}} \quad (1)$$

Manjša hladilna moč in večja moč kompresorja v postopku z R407C se kaže s 3 odstotki (pri višjih temperaturah uparjanja) do 5 odstotkov (pri nižjih temperaturah uparjanja) nižjim ε glede na R22.

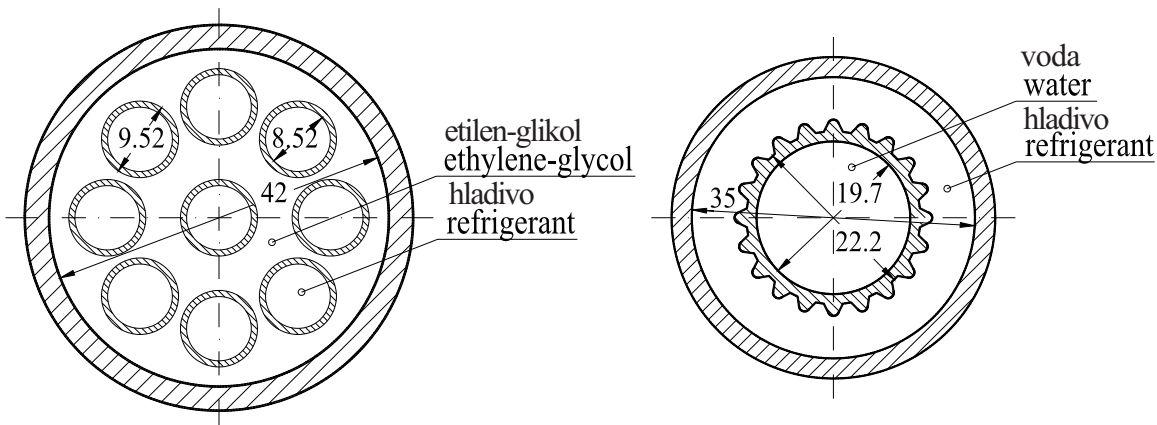
heat-transfer coefficients (see section 3.2), than with the R22. This decrease in the heat-transfer coefficient when working with R407C is due to the fractionation of the zeotropic mixture, the different solubilities of the components and the lubricating oil, and the change in the properties during evaporation and condensation (see section 4).

The coefficient of performance for cooling (COP- ε) is defined in terms of the power of the electrical motor (P_{EM}) that runs the compressor:

A lower cooling capacity and a larger compressor power in the process with R407C results in a 3% (at a high evaporation temperature) to 5% (at a low evaporation temperature) lower COP than with R22.



Sl. 5. Hladilno število ε kot funkcija temperature uparjanja θ_e
 Fig. 5. COP- ε cooling as a function of the evaporation temperature θ_e



Sl. 6. Prerez cevi prenosnika
 Fig. 6. The cross-section of the exchanger tubes

3.2 Prenos toplote

Za določitev koeficienta prenosa toplote v uparjalniku in kondenzatorju (sl. 6) je bila uporabljena celovita metoda srednje logaritemske temperaturne razlike ([6] in [7]).

$$k = \frac{\Phi}{A_o \Delta \vartheta_m} \quad (2)$$

Koeficient prenosa toplote na strani hladiva (α_i) v uparjalniku (kondenzatorju) je definiran z enačbo toplotne upornosti:

$$\frac{1}{kA_o} = \frac{1}{\alpha_o A_o} + R_w + \frac{1}{\alpha_i A_i} \quad (3)$$

α_i in α_o sta povprečna koeficienta prenosa toplote v cevi in kolobarju, R_w je upornost stene cevi.

Celotna upornost temelji na zunanji površini cevi ($d_o \pi L$), kjer je d_o zunanji premer notranjega kolobarja in L je dejanska dolžina prenosa toplote. Določevanje koeficienta prenosa toplote na notranji strani (α_i) v enačbi (3) zahteva poznavanje koeficienta prenosa toplote na zunanji strani (α_o). To izračunamo glede na znane enačbe iz literature o toku čistega sredstva [8]. Enačbo (3) lahko potem spremenimo in dobimo:

$$\alpha_i = \frac{1}{\frac{d_i}{d_o} \left[\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha_o} - \frac{d_o}{2\lambda_{Cu}} \ln \frac{d_o}{d_i} \right]} \quad (4)$$

Slika 7 predstavlja odvisnost merjene srednje logaritemske temperaturne razlike ($\Delta \vartheta_m$) na uparjalniku kot funkcijo toplotnega toka

Slika 10 prikazuje odvisnost povprečnega koeficienta prenosa toplote kot funkcijo toplotnega toka. Vrednosti toplotnega toka so v mejah

3.2 Heat Transfer

To determine the heat-transfer coefficient in the evaporator and condenser (Figure 6), the integral method of a log mean-temperature difference is used ([6] and [7]).

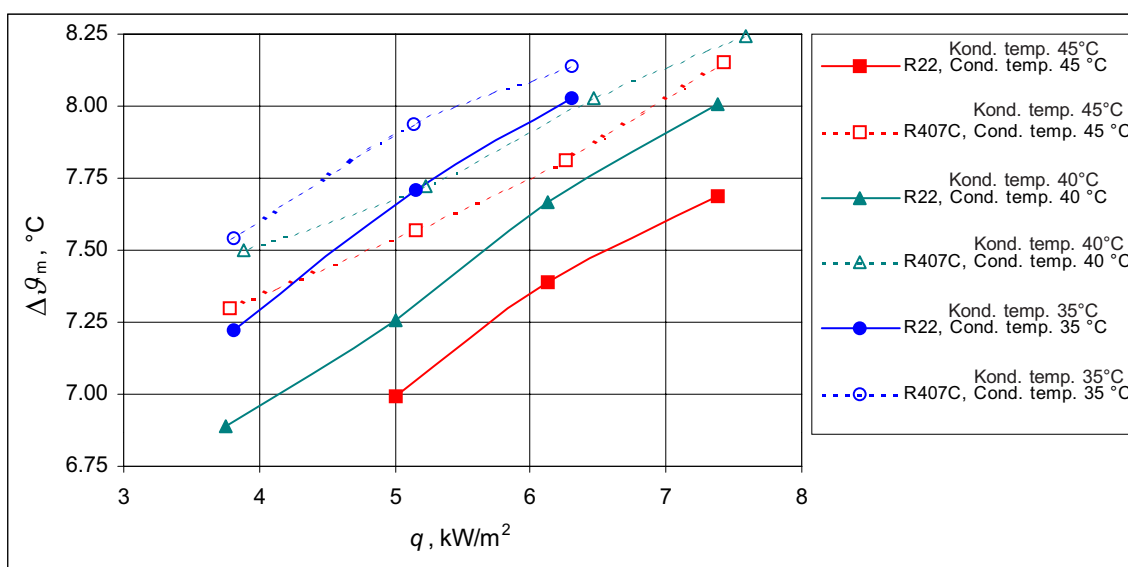
The heat-transfer coefficient on the refrigerant side (α_i) of the evaporator (condenser) is defined from the thermal resistance equation:

where α_i and α_o are the average heat-transfer coefficients in the tube and annulus, and R_w is the wall resistance of the tube.

The overall resistance is based on the outer surface of the tube ($d_o \pi L$), where d_o is the outside diameter of the inner tube, and L is the effective heat-transfer length. The determination of the inner heat-transfer coefficient (α_i) in Equation (3) requires knowledge of the outside heat-transfer coefficient (α_o). This is calculated according to equations from the literature on the flow of a pure medium [8]. Equation (3) can then be altered to give:

Figure 7 shows the dependence of the measured log mean-temperature difference ($\Delta \vartheta_m$) on the evaporator as a function of the heat flux.

Figure 10 shows the dependence of the average heat-transfer coefficient as a function of the heat flux. The readings of the heat flux are within the



Sl. 7. Srednja logaritemska temperaturna razlika $\Delta \vartheta_m$ uparjalnika kot funkcija toplotnega toka
Fig. 7. Log mean-temperature difference $\Delta \vartheta_m$ of the evaporator as a function of the heat flux

$q = 3,8$ do $7,5$ kW/m²K. Rezultati kažejo, da je pri postopku s hladivom R407C toplotni tok 10 do 25 odstotkov manjši kakor z R22.

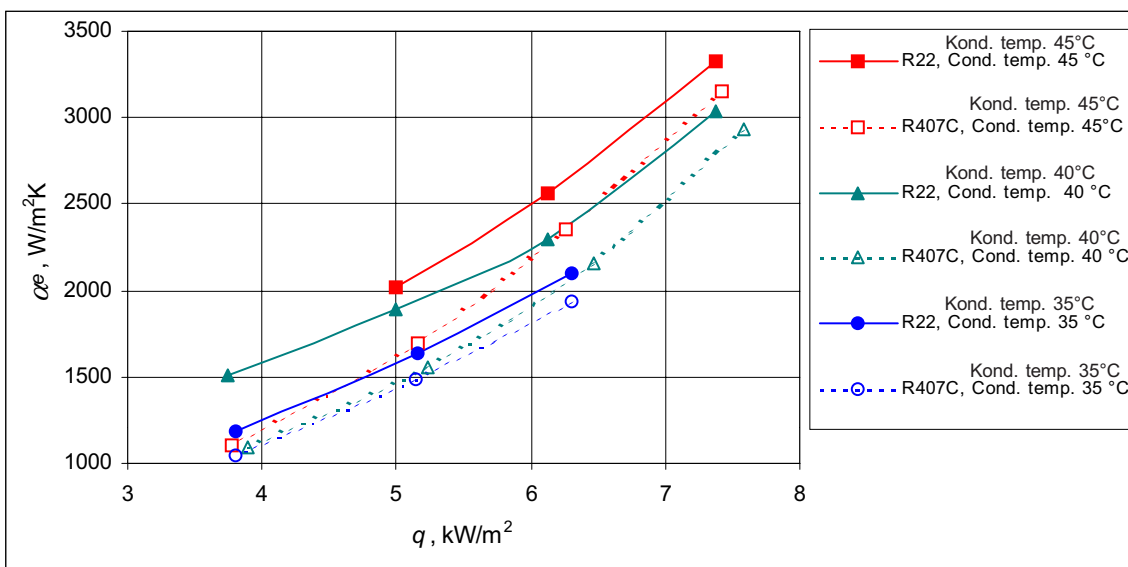
Slika 9 predstavlja odvisnost srednje logaritemske temperaturne razlike ($\Delta\vartheta_m$) na kondenzatorju kot funkcijo toplotnega toka.

Povprečni koeficient prenosa toplote v kondenzatorju je predstavljen kot funkcija toplotnega toka. V primerjavi z uparjalnikom je razlika v prenosu toplote primerjanih hladiv celo bolj očitna. V postopku s hladivom R22 je prenos toplote za 35 odstotkov večji kakor z R407C.

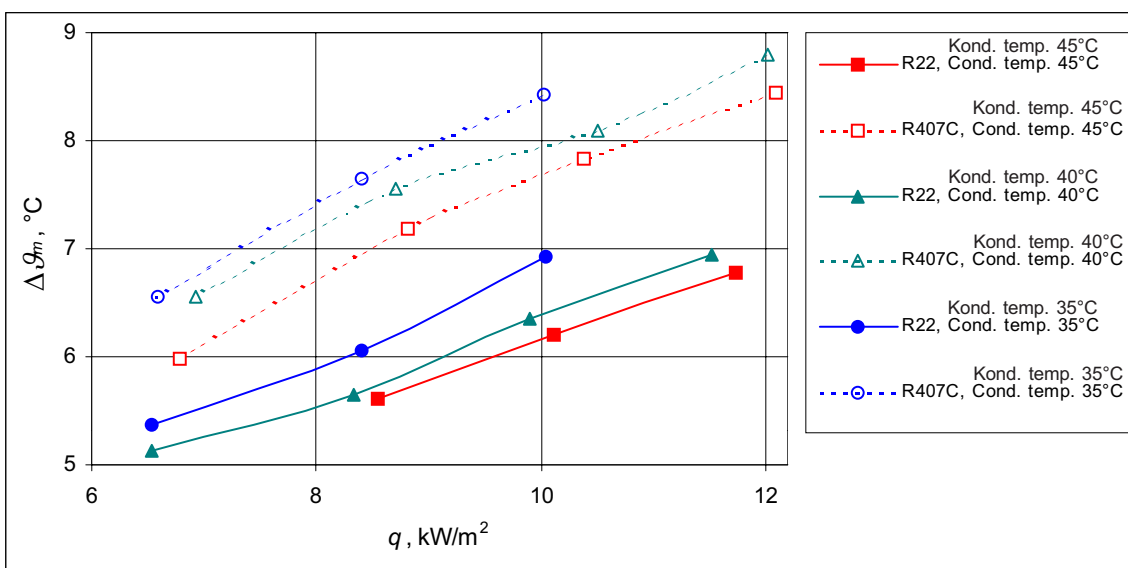
limits $q = 3.5$ to 7.5 kW/m²K. The results show that in the process with the refrigerant R407C, the heat transfer is 10 to 25% lower than with the R22.

Figure 9 shows the dependence of the log mean-temperature difference ($\Delta\vartheta_m$) on the condenser as a function of the heat flux.

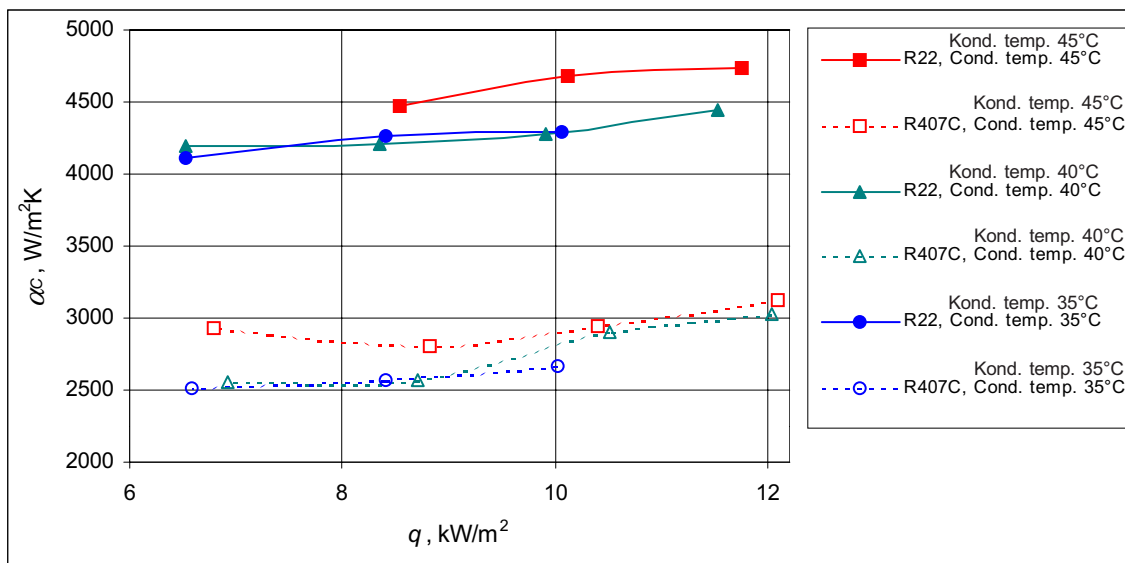
The average heat-transfer coefficient in the condenser is presented as the heat-flux function. In relation to the evaporator, the difference in the heat transfer of the compared refrigerants is even more obvious. In the process with the refrigerant R22 the heat transfer is 35 % higher than with the R407C.



Sl. 8. Povprečni koeficient prenosa toplote α_e v uparjalniku kot funkcija toplotnega toka q
 Fig. 8. Average heat-transfer coefficient α_e in the evaporator as a function of the heat flux q



Sl. 9. Srednja logaritemska temperaturna razlika $\Delta\vartheta_m$ na kondenzatorju kot funkcija toplotnega toka q
 Fig. 9. Log mean-temperature difference $\Delta\vartheta_m$ on the condenser as a function of the heat flux q



Sl. 10. Povprečni koeficient prenosa toplote α_c v kondenzatorju kot funkcija toplotnega toka q
 Fig. 10. Average heat-transfer coefficient α_c in the condenser as a function of the heat flux q

4 SKLEP

V tem prispevku so bili primerjani celotni toplotni izkoristki ter povprečni koeficienti prenosa toplote, dobljeni na sotočnem prenosniku toplote cev v cevi pri delovanju z R407C in R22.

Dobljeni rezultati so naslednji:

- Da bi Lorenz-ov delovni postopek tekkel, je nujno treba zagotoviti temperaturno spremembo (temperaturni zdrs 5 °C do 7 °C) zeotropne zmesi R407C, ki je enaka temperaturni spremembi zunanega sredstva (hlajeni etilen - glikol v uparjalniku in hladilna voda v kondenzatorju).
- Lorenzov postopek lahko izvedemo samo z uporabo protitočnih prenosnikov toplote. Uporabiti je treba istoosni ali ploščni tip prenosnika. Izigibati se moramo poplavljenih prenosnikov, zato je treba uporabiti suhe uparjalnike.
- Hladilna sposobnost in ε z R407C sta približno 3 do 5 odstotkov nižja, poraba energije kompresorja med testiranjem R407C je za 3 odstotke večja kakor pri testih z R22 v enakih razmerah.
- Čeprav so teoretične analize za sisteme z zeotropnimi zmesmi pokazale povečanje toplotnih učinkovitosti (ε in hladilne moči), tega eksperimentalni rezultati niso potrdili [1]. Razlog za to so manjši koeficienti prenosa toplote v postopku s hladivom R407C ([6] in [7]). Eksperimentalni rezultati so potrdili, da so povprečni koeficienti prenosa toplote pri uparjanju za R407C od 10 do 25 odstotkov manjši ter do 35 odstotkov manjši za kondenzacijo v primerjavi z R22. Razlika glede na čisto hladivo je zaradi razstavitve zeotropnih zmesi, kar je posledica spremembe kapljevite in parne faze v uparjalniku in kondenzatorju ([2] in [3]). Nadalje, mešanice so zmesi dveh ali več komponent hladiva, ki imajo precej različne temperature uparjanja. Torej,

4 CONCLUSION

In this paper the overall thermal performances and the average heat-transfer coefficients obtained on coaxial tube-in-tube exchangers operating with R407C and R22 were compared.

The obtained results are as follows:

- In order to run the Lorenz process it is necessary to provide a temperature change (temperature glide 5 to 7 °C) of the zeotropic mixture R407C equal to the temperature change of the external medium (cooled ethylene-glycol in the evaporator and cooling water in the condenser).
- The Lorenz process can only be realized when the counter-flow heat exchangers are applied. It is necessary to use a coaxial or a plate-type exchanger. Flooded heat exchangers must be avoided, dry evaporators should be used instead.
- The cooling capacity and COP with R407C are approximately 3 to 5 % lower, and the compressor power consumption during the R407C tests is up to 3 % higher than the R22 tests under the same conditions.
- Although a theoretical analysis showed an increase in thermal performances (COP and cooling capacity) for the system using zeotropic mixtures, the experimental results did not confirm this [1]. The reason is the lower heat-transfer coefficients in the process with refrigerant R407C ([6] and [7]). The experimental results confirmed that the average heat-transfer coefficients for R407C are 10 to 25 % lower for evaporation and 35 % lower for condensation, compared to R22. The variation with respect to the pure refrigerant is a fractionation of the zeotropic mixtures, which is the effect of the change in the liquid and vapor phases in the evaporator and condenser ([2] and [3]). Furthermore, the blends are mixtures of two or more single-component refrigerants that have significantly different evaporation

delež pare se med uparjanjem nasiti z večjim deležem topljive sestavine, medtem ko se delež manj topljive sestavine v preostali tekočini poveča. Da bi zmanjšali ta vpliv, je sistem načrtovan brez kakršnihkoli zbiralnih posod ter vodnih prenosnikov toplote. V uparjalniku hladivo teče skozi cevi in pojavi se suho uparjanje. Dvig koncentracije zeotropne zmesi je lahko odvisen od različne topljivosti komponente in mazalnega olja [3].

- Razstavitev in različna topljivost sestavin hladiva povzroči slabši prenos toplote. Zaradi teh razlogov je pri uporabi R407C za doseg enake zmogljivosti treba uporabiti večjo temperaturno razliko na prenosnikih toplote (uparjalnik in kondenzator) kakor pri R22.
- Iz tega lahko povzamemo, da je R407C dobra zamenjava za R22 pri uporabah z višjimi temperaturami (od -5 °C do 10 °C), toda njegova učinkovitost se glede na R22 z zmanjšanjem temperature uparjanja zmanjšuje. Pri tem moramo opozoriti, da so bili ti preskusi opravljeni s protitočnimi prenosniki toplote (uparjalnik in kondenzator) in da lahko pričakujemo manjše učinkovitosti za prenosnike s križnim tokom, ki ne izkoriščajo kakršnegakoli zdrsa temperature.

temperatures. Thus, the vapor content during the evaporation becomes saturated with the more volatile component, while the content of the less volatile component in the residual liquid increases. In order to avoid this influence, the system is designed without any receiver and flooded heat exchangers. In the evaporator, the refrigerant flows through the tubes and the dry evaporation is used. Also, the composition shift of the zeotropic mixture may result from the different solubility of its components and lubricating oil [3].

- The fractionation and different solubility of the refrigerant components causes lower heat-exchange characteristics. For these reasons, when R407C is used to achieve the same capacity, a bigger temperature difference on the heat exchangers (evaporator and condenser) than for R22 is necessary.
- We can conclude that R407C is a good replacement for R22 in higher temperature applications (from -5 to 10 °C), but its performance does degrade with respect to R22 as the evaporator temperature is decreased [3]. It should also be noted that these tests were carried out with counter-flow heat exchangers (evaporator and condenser) and the performances would be expected to be lower for cross-flow exchangers, which are unable to benefit from any temperature glide.

5 SIMBOLI 5 SYMBOLS

zunanja površina prenosa toplote na cevi
notranja površina prenosa toplote na cevi
zunanji premer cevi
notranji premer cevi
toplotna prehodnost
dejanska dolžina ogrevanja
moč elektromotorja
tlak
toplotni tok
upornost stene
specifična entropija
absolutna temperatura
koeficient prenosa toplote na notranji strani
koeficient prenosa toplote v kolobarju
toplotna prevodnost
temperatura
srednja logaritemska temperaturna razlika
koeficient učinkovitosti hlajenja
hladilna moč
grelna moč

A_o	m	external heat-transfer area of the tube
A_i	m ²	internal heat-transfer area of the tube
d_o	m	external diameter of the tube
d_i	m	internal diameter of the tube
k	W/m ² K	overall heat-transfer coefficient
L	m	effective heating length
P_{EM}	W	electrical motor power
p	Pa	pressure
q	W/m ²	heat flux
R_w	m ² K/W	wall resistance
s	J/kgK	specific entropy
T	K	absolute temperature
α_i	W/m ² K	internal heat-transfer coefficient
α_o	W/m ² K	heat-transfer coefficient on the annulus side
λ_{Cu}	W/mK	thermal conductivity
ϑ	°C	temperature
$\Delta\vartheta_m$	°C	log mean-temperature difference
ε / COP		coefficient of performance-cooling
Φ_o	W	cooling capacity
Φ_c	W	heating capacity

Indeksi

kondenzacija
uparjanje
etilen glikol
ogrevanje

Subscript

C	condensation
e	evaporation
EG	ethylene glycol
h	heating

6 LITERATURA

6 REFERENCES

- [1] Soldo, V. (2000) Development of the experimental rig for thermodynamic efficiency process operating with a zeotropic mixtures, Master of science thesis, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb.
- [2] Cavallini, A., D. Del Col, L. Doretti, G.A. Longo, L. Rossetto (1999) Condensation of R-22 and R407C inside a horizontal tube, *Proceedings of 20th International Congress of Refrigeration*, IIR/IIF, Sydney.
- [3] Mongey, B., N.J. Hewitt, J.T. McMullan (1996) R407C as an alternative to R22 in refrigeration systems, *International Journal of Energy Research*, Vol. 20, 245-254.
- [4] McLinden, M., S. Klein, E. Lemmon, A. Peskin (1998) NIST thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures, REFPROP Version 6.01, *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg.
- [5] Triebe, A.R., J.W. Linton, W.K. Snelson, P.F. Hearty (1999) Cooling performance R407C and R410A compared to R22 on a constant capacity basis, *Proceedings of 20th International Congress of Refrigeration*, IIR/IIF, Sydney.
- [6] Kuo, C.S., C.C. Wang (1996) In-tube evaporation of HCFC-22 in a 9.52 mm micro-fin/smooth tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 12, 2559-2569.
- [7] Bogart, J., P. Thors, (1999) In-tube Evaporation of R-22 and tree of its alternatives in a 15.88 mm internally Enhanced Tube, *Enhanced Heat Transfer*, Vol 6, 317-326.
- [8] Kaka, S., H. Liu (1998) Heat exchangers, *University of Miami*, Florida.

Naslov avtorjev: mag. Vladimir Soldo
prof.dr. Tonko Ćurko
mag. Vlasta Zanki
Fakulteta za strojništvo in
ladjedelništvo
Univerza v Zagrebu
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb, Hrvatska
vladimir.soldo@fsb.hr
tonko.curko@fsb.hr
vlasta.zanki@fsb.hr

Authors' Address: Mag. Vladimir Soldo
Prof.Dr. Tonko Ćurko
Mag. Vlasta Zanki
Faculty of Mechanical Eng. and
Naval Architecture
University of Zagreb
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb, Croatia
vladimir.soldo@fsb.hr
tonko.curko@fsb.hr
vlasta.zanki@fsb.hr

Prejeto: 1.3.2002
Received:

Sprejeto: 29.5.2003
Accepted:

Odprt za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Entropijska analiza sotočnih prenosnikov toplote

Entropy Analysis of Parallel-Flow Heat Exchangers

Antun Galović - Marija Živić - Mladen Andrassy

V prispevku obravnavamo povečanje entropije v ločilnih sotočnih prenosnikih toplote. Med delovanjem menjalnika se pojavljata dva vira entropije, vsled padca tlaka zaradi trenja in zaradi prenosa toplote. Obravnavajmo samo prenos toplote. Analiza je opravljena z matematičnim modelom, ki uporablja ista brezrazsežna števila, kakor jih je pred leti uvedel Bošnjaković pri energijski analizi prenosnikov toplote. Ovrednoten je vpliv posameznih brezrazsežnih spremenljivk (delovni pogoji sotočnega prenosnika toplote) na povečanje entropije. Izsledki so prikazani brezrazsežno v diagramih, kar jim daje bolj splošen pomen. Posebej so opisane delovne razmere sotočnega rekuperatorja, ki so povsem enake tudi pri protitočnih in križnih menjalnikih.

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: prenosniki toplote, povečevanje entropije, učinkovitost, rešitve analitične)

The entropy generation in a parallel-flow recuperative heat exchanger is analysed in this paper. During the operation of a heat exchanger two sources of entropy generation normally exist: the pressure drop (friction) source and the heat-exchange source. Here, only the heat-exchange source is considered. The analysis is performed using an analytical mathematical model and the same non-dimensional numbers that were introduced into the energy analysis of heat exchangers by Bošnjaković, many years ago. The influence of the individual non-dimensional variables (the operating points of the parallel-flow heat exchanger) on the entropy generation is quantified. The results are presented non-dimensionally in diagrams, which gives them a more universal meaning. Special conditions, i.e. the boundary operating conditions, of the parallel-flow recuperator, which are identical to those for counter-flow and cross-flow exchangers, are also discussed.

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: heat exchangers, entropy generation, effectiveness, analytical solutions)

0 UVOD

V splošnem sta dva vzroka za povečevanje entropije v vsaki vrsti prenosnikov toplote: razlika temperatur med obema pretokoma in padec tlaka zaradi trenja v tokovih skozi prenosnik. Podrobno in sistematično analizo vpliva znižanja tlaka in temperaturne razlike dobimo v [1] in [2].

V tem prispevku ne bomo obravnavali vpliva padca tlaka na povečevanje entropije. Podobne analize najdemo tudi v novejših virih [3] in [4], ki med drugim ocenjujejo povezanost povečanja entropije in izkoristka z namenom pridobitve najugodnejših delovnih pogojev prenosnika toplote.

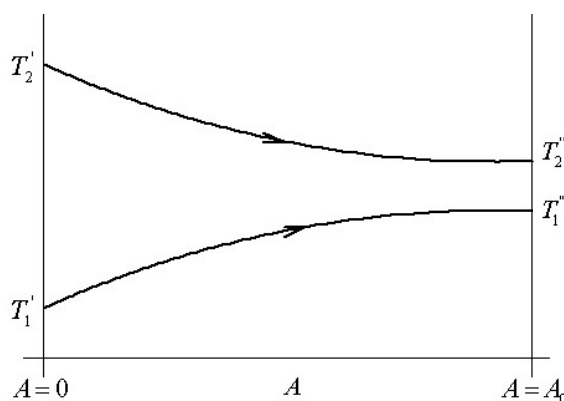
Namen tega prispevka je prikazati povezavo med povečanjem entropije in izkoristkom sotočnih prenosnikov toplote kot odvisnost znanih brezrazsežnih števil π_1 , π_2 in π_3 , ki jih je v energijsko

0 INTRODUCTION

There are generally two causes of entropy generation in any type of heat exchanger: the temperature difference between the flows and the pressure drop induced by the friction in the flows streaming through the exchanger. A detailed and systematic analysis of the influence of pressure drop and temperature difference of the flows may be found in [1] and [2].

In this paper the pressure drop influence on the entropy generation is neglected. Similar analyses may also be found in recent works [3] and [4] that analyse, amongst other factors, the relationship between entropy generation and the effectiveness in order to determine the optimum operating parameters of the heat exchanger.

The objective of this paper is to show the relationship between entropy generation and the effectiveness of parallel-flow heat exchangers as a function of the known non-dimensional numbers π_1 , π_2 and π_3 , introduced into



Sl. 1. Potek temperature vzdolž površin sotočnega prenosnika toplote

Fig. 1. Temperature change along the surface area of a parallel-flow heat exchanger

analizo uvedel Bošnjaković [4], kakor tudi pred kratkim uvedeno brezrazsežno število π_r za potrebe predstavljene entropijske analize. Dobljeni model tako lahko neposredno uporabimo v optimizacijski postopek sotočnih prenosnikov toplote.

1 MATEMATIČNI ZAPIS PROBLEMA

Enačbo povečanja entropije v odvisnosti od toplotne zmogljivosti ter vstopnih in izstopnih temperatur pretokov zlahka dobimo z integracijo vzdolž tokovnic obeh tekočin:

$$\Delta \dot{S}_{\text{gen}} = C_1 \ln \frac{T_1''}{T_1'} + C_2 \ln \frac{T_2''}{T_2'} \quad (1)$$

kjer indeksa 1 in 2 pomenita šibkejši in močnejši pretok. Pretok z večjo toplotno zmogljivostjo $C = q_m \cdot c_p$ imejmo za močnejšega. Z delitvijo s toplotno zmogljivostjo močnejšega pretoka C_2 zgornja enačba postane brezrazsežna:

$$\frac{\Delta \dot{S}_{\text{gen}}}{C_2} = \pi_3 \ln \frac{T_1''}{T_1'} + \ln \frac{T_2''}{T_2'} \quad (2)$$

Člen π_3 v enačbi (2) je po Bošnjakovićevi zasnovi razmerje toplotnih zmogljivosti šibkejšega in močnejšega pretoka:

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} = \frac{q_{m1} c_{p1}}{q_{m2} c_{p2}} \quad (3)$$

Z uporabo obrazca za brezrazsežno število π_1 prenosnikov toplote (kar je tudi enako izkoristku menjalnika ε [4])

$$\pi_1 = \frac{T_1' - T_1''}{T_1' - T_2'} \quad (4)$$

kakor zaradi enačbe ohranitve energije:

$$C_1 (T_1' - T_1'') = C_2 (T_2' - T_2'') \quad (5)$$

enačbo (2) preoblikujemo v:

$$\frac{\Delta \dot{S}_{\text{gen}}}{C_2} = \pi_3 \ln \left(1 - \pi_1 \left(1 - \frac{T_2''}{T_1'} \right) \right) + \ln \left(1 + \pi_1 \pi_3 \left(\frac{T_1'}{T_2'} - 1 \right) \right) \quad (6)$$

the energy analysis by Bošnjaković [4], and the newly introduced non-dimensional number π_r , for the purposes of the present entropy analysis. The model obtained may thus be directly included into the parallel-flow heat-exchanger optimisation process.

1 THE MATHEMATICAL FORMULATION OF THE PROBLEM

The equation for entropy generation as a function of thermal capacities and the inlet and outlet temperatures of the flows is easily obtained by an integration along the streamlines of both flows:

where the indices 1 and 2 designate the weaker and the stronger flows respectively. The flow with the larger heat capacity $C = q_m \cdot c_p$ is considered to be stronger. Dividing by the heat capacity of the stronger flow C_2 the above equation becomes non-dimensional:

The member π_3 in Equation (2), according to Bošnjaković's concept, is the ratio of the heat capacities of the weaker and stronger flows:

Using the formula for the non-dimensional number π_1 of heat exchangers (which is also identical to the effectiveness of the exchanger ε [4]):

as well as the energy-conservation equation:

Equation (2) is transformed into:

Vrednost π_1 lahko izrazimo kot odvisnost med brezrazsežnima številoma π_2 in π_3 , kakor navajajo Bošnjakovićevi učbeniki (izpeljavo funkcijske odvisnosti najdemo v [6]):

$$\pi_1 = \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \quad (7),$$

kjer je

$$\pi_2 = \frac{kA_0}{C_1} \quad (8).$$

Z vstavitvijo (7) v (6) in označitvijo razmerja med vstopnimi temperaturami:

$$\pi_T = \frac{T_2'}{T_1'} \quad (9),$$

dobimo enačbo (6) v njeni končni obliki

$$\frac{\Delta \dot{S}_{gen}}{\dot{C}_2} = \pi_3 \ln \left(1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) + \ln \left(1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left(\frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \quad (10).$$

Enačba (10) pove, da povečanje entropije v sotočnem prenosniku toplote lahko izrazimo z uporabo istih brezrazsežnih števil π_2 in π_3 , kakor jih je uporabil Bošnjaković na ravni energetske analize. Uporabiti moramo dodatno brezrazsežno število π_T .

Preden podamo grafično ponazoritev enačbe (10), zapišimo nekaj pripomb o posebnih primerih.

- Ko je $\pi_T = 1$, enačba (10) daje $\Delta \dot{S}_{gen}/C_2 = 0$, kar je pravilno, saj pomeni primer enakih vstopnih temperatur, ko ni ne spremembe toplote in ne povečanja entropije.
- V primeru izmišljenega prenosnika toplote z neskončno veliko menjalno površino, ko $\pi_2 \rightarrow \infty$, enačba (10) postane:

$$\left(\frac{\Delta \dot{S}_{gen}}{\dot{C}_2} \right)_{\pi_2 \rightarrow \infty} = \pi_3 \ln \frac{\pi_3 + \pi_T}{1 + \pi_T} + \ln \frac{\pi_T + \pi_3}{\pi_T (1 + \pi_3)} \quad (11),$$

kar pomeni pri določenih vrednostih π_3 in π_T povečanje entropije do končne vrednosti (vodoravna asimptota).

- Dodatno, v primeru pretokov enakih toplotnih zmogljivosti, ko je $\pi_3 = 1$, postane enačba (11):

$$\left(\frac{\Delta \dot{S}_{gen}}{\dot{C}_2} \right)_{\pi_2 \rightarrow \infty, \pi_3 = 1} = \ln \frac{(1 + \pi_T)^2}{4\pi_T} \quad (12).$$

- Kadar eden od pretokov kondenzira ali se uparja (fazna premena, npr. $C_2 = \infty$; $\pi_3 = 0$; $T_2' = T_2'' = \text{konst}$), postane enačba (10):

$$\frac{\Delta \dot{S}_{gen}}{C_2} = 0 \quad (13),$$

dobimo nedoločeno vrednost:

$$\Delta \dot{S}_{gen} = 0 \cdot C_2 = 0 \cdot \infty \quad (14).$$

V tem primeru je nedoločen tudi drugi člen v enačbi (1) in ga moramo spremeniti v skladu z drugim

The value π_1 may be expressed as a function of the non-dimensional numbers π_2 and π_3 as it is stated in Bošnjaković's textbooks (the derivation of the functional relation may be found in [6]):

Inserting (7) into (6), and denoting the ratio of the inlet temperatures with:

Equation (6) takes its final form:

Equation (10) indicates that the entropy generation of a parallel-flow exchanger may be expressed by means of the same non-dimensional numbers π_2 and π_3 , as introduced by Bošnjaković in the energy-level analysis. However, the additional non-dimensional number π_T must be used.

Before the graphical presentation of Equation (10) is given, here are some comments on its special cases:

- If $\pi_T = 1$, eq. (10) yields $\Delta \dot{S}_{gen}/C_2 = 0$. This is physically correct, because it represents the case of equal inlet temperatures, where there is no exchange of heat and thus no entropy generation.
- For the case of a hypothetical exchanger with an infinite heat-exchange surface area, where $\pi_2 \rightarrow \infty$, Eq. (10) becomes:

indicating that the entropy generation for defined values of π_3 and π_T tends to a finite value (horizontal asymptote).

- Additionally, in the case of flows of equal heat capacities, where $\pi_3 = 1$, eq. (11) becomes:

- When one of the flows condenses or evaporates (phase change: e.g. $C_2 = \infty$; $\pi_3 = 0$; $T_2' = T_2'' = \text{const}$), where eq. (10) becomes:

the undetermined value occurs:

In this case the second member in Eq. (1) is also undetermined and has to be modified according

zakonom termodinamike, glede na nespremenljivo temperaturo močnejšega pretoka:

$$\Delta\dot{S}_{\text{gen}} = C_1 \ln \frac{T_1'}{T_1} + \frac{C_1(T_1' - T_1'')}{T_2} \quad (15),$$

ki se, po izločitvi T_1'' in uporabi enačb (4), (7) in (9), spremeni v zeleno obliko:

$$\frac{\Delta\dot{S}_{\text{gen}}}{C_1} = \ln(\exp(-\pi_2) + \pi_T(1 - \exp(-\pi_2))) + \left(\frac{1}{\pi_T} - 1\right)(1 - \exp(-\pi_2)) \quad (16).$$

Če enačbi (10) in (16) delimo z izkoristkom $\varepsilon = \pi_1$, dobimo razmerja $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_2\varepsilon$ in $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1\varepsilon$, ki podajajo obseg pozitivnega povečanja entropije glede na hitrost prenosa toplote:

$$\frac{\Delta\dot{S}_{\text{gen}}}{C_2\varepsilon} = \frac{1}{\pi_1} \left[\pi_3 \ln \left(1 - \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} (1 - \pi_T) \right) \right] + \frac{1}{\pi_1} \left[\ln \left(1 + \pi_3 \frac{1 - \exp(-(1 + \pi_3)\pi_2)}{1 + \pi_3} \left(\frac{1}{\pi_T} - 1 \right) \right) \right] \quad (17),$$

$$\frac{\Delta\dot{S}_{\text{gen}}}{C_1\varepsilon} = \frac{1}{\pi_1} \left[\ln(\exp(-\pi_2) + \pi_T(1 - \exp(-\pi_2))) + \left(\frac{1}{\pi_T} - 1\right)(1 - \exp(-\pi_2)) \right] \quad (18),$$

kjer π_1 v (17) izračunamo po (7) oziroma v (18) z:

$$\pi_1 = 1 - \exp(-\pi_2) \quad (19).$$

2 GRAFIČNA PONA ZORITEV IZRAČUNA POVEČANJA ENTROPIJE

Podani matematični postopek smo preli v računalniški zapis z uporabo Fortrana, rezultate pa prikažimo grafično. Seveda mora biti graf enačbe (10) prostorski, saj je odvisnost brezrazsežne vrednosti $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_2$ funkcija π_2 , π_3 in π_T . Ustrezno diagram na sliki 2 kaže povečanje entropije v odvisnosti od π_2 in π_3 za ravni ploskev $\pi_T = 2, 4, 6, 8$ in 10 , medtem ko diagram na sliki 3 predstavlja isto odvisnost za $\pi_T = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ in $1,0$.

Iz diagramov lahko razberemo, da vse parametrične krivulje π_1 kažejo ničelno povečanje entropije pri $\pi_3 = 0$, kar smo že poprej opisali pod c) med pripombami o posebnih primerih. Povečanje entropije v tem primeru je prikazan v diagramih na slikah 4 in 5. Diagrama na sliki 4a in 4b sta narisana po enačbi (16) za vse vrednosti parametra $\pi_T = 0,2$ do $1,0$ in $2,0$ do $10,0$. Vrednosti odvisnosti iz (18) so prav tako podane v teh diagramih. Diagram na sliki 5, narisana za $\pi_2 = 1,0$ in $\pi_3 = 0$, jasno kaže vpliv π_T na brezrazsežno povečanje entropije. Diagrami na slikah 6 in 7 podajajo vrednosti, dobljene z uporabo enačb (10) in (17) za $\pi_3 = 0,5$ in $\pi_T = 0,2$ do $1,0$ oziroma za $\pi_3 = 0,5$ in $\pi_T = 2,0$ do $10,0$. Diagrami na slikah 8 in 9 ovrednotijo iste spremenljivke za $\pi_3 = 1,0$.

to the Second law of thermodynamics, regarding the constant temperature of the stronger flow:

which, after eliminating T_1'' and using Eq. (4), (7) and (9), is transformed into the required form:

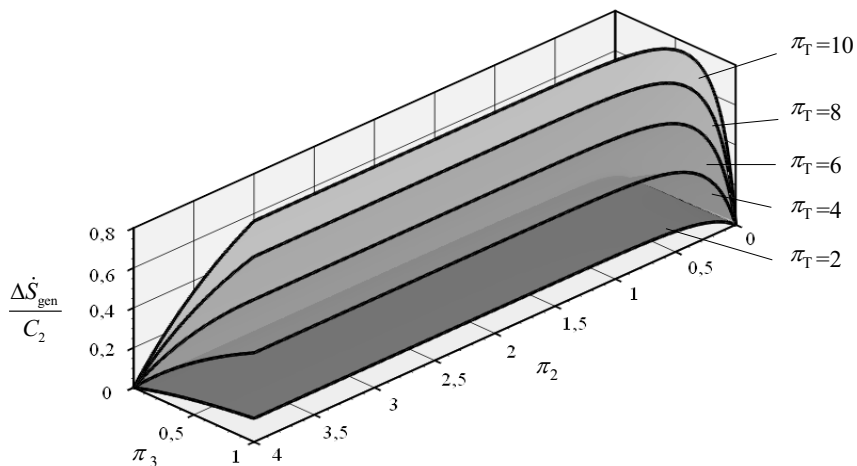
If the Eq. (10) and (16) are divided by the effectiveness $\varepsilon = \pi_1$, the ratios $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_2\varepsilon$ and $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1\varepsilon$ are obtained, as relevant indicators of the range where the entropy generation is acting positively on the exchanged-heat flow rate:

where π_1 in (17) is calculated according to (7), and in (18) according to:

2 GRAPHICAL PRESENTATION OF THE ENTROPY-GENERATION CALCULATION

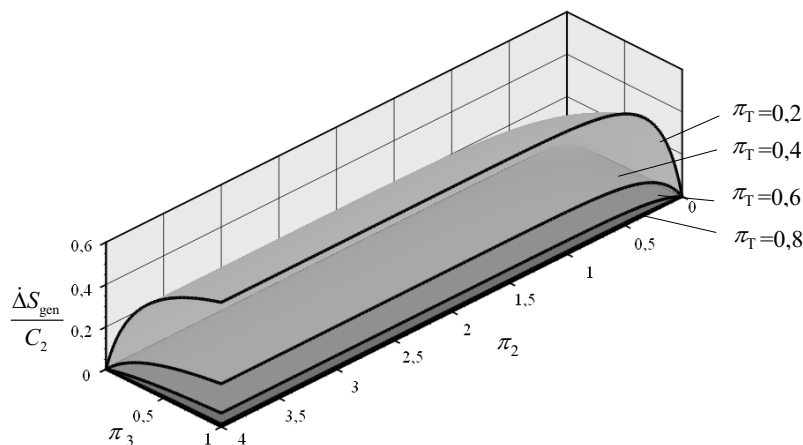
The presented mathematical procedure was put into a calculation algorithm using Fortran, and the results are presented graphically. It is obvious that the graph of Eq. (10) must be three dimensional, because the non-dimensional value $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_2$ is the function of π_2 , π_3 and π_T . Accordingly, the diagram in Fig. 2 displays the entropy generation as a function of π_2 and π_3 through the niveau surfaces $\pi_T = 2, 4, 6, 8$ and 10 , while the diagram in Fig. 3 represents the same relationship for $\pi_T = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ and $1,0$.

It can be seen from the diagrams that all the parametric curves π_T give a zero-entropy generation for $\pi_3 = 0$, which is explained above in part c) of the comments on special cases. The entropy generation for this case is presented in the diagrams in Figures 4 and 5. The diagrams in Figure 4a and 4b are plotted according to Eq. (16) for all the parametric curves $\pi_T = 0,2$ to $1,0$ and $2,0$ to $10,0$ respectively. The values of the function defined by (18) are shown in the same diagrams. The diagram in Fig. 5, drawn for $\pi_2 = 1,0$ and $\pi_3 = 0$, clearly indicates the influence of π_T on the non-dimensional entropy generation. The diagrams in Figure 6 and 7 represent the values obtained by using equations (10) and (17) for $\pi_3 = 0,5$ and $\pi_T = 0,2$ to $1,0$, and for $\pi_3 = 0,5$ and $\pi_T = 2,0$ to $10,0$, respectively. The diagrams in Figure 8 and 9 quantify the same variables for $\pi_3 = 1,0$.



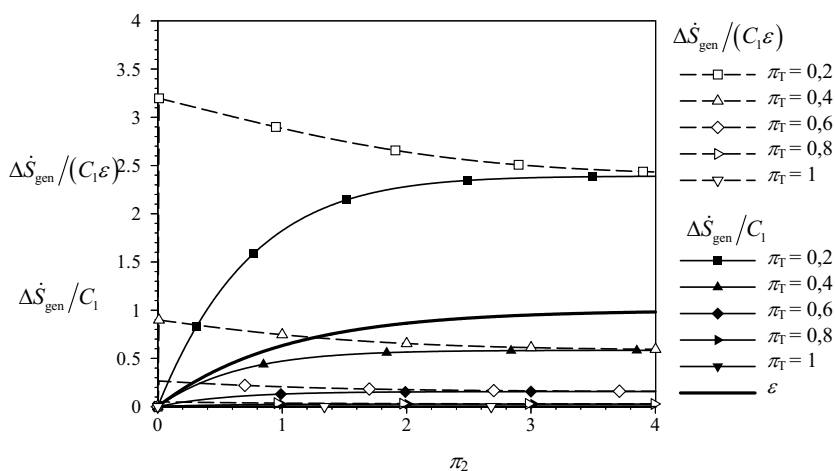
Sl. 2. Brezrazsežno povečanje entropije v sotočnem prenosniku toplote v odvisnosti od π_2 in π_3 pri $\pi_T = 2, 4, 6, 8$ in 10 kot parametri

Fig. 2. Non-dimensional entropy generation of a parallel-flow heat exchanger as a function of π_2 and π_3 with $\pi_T = 2, 4, 6, 8$ and 10 as parameters



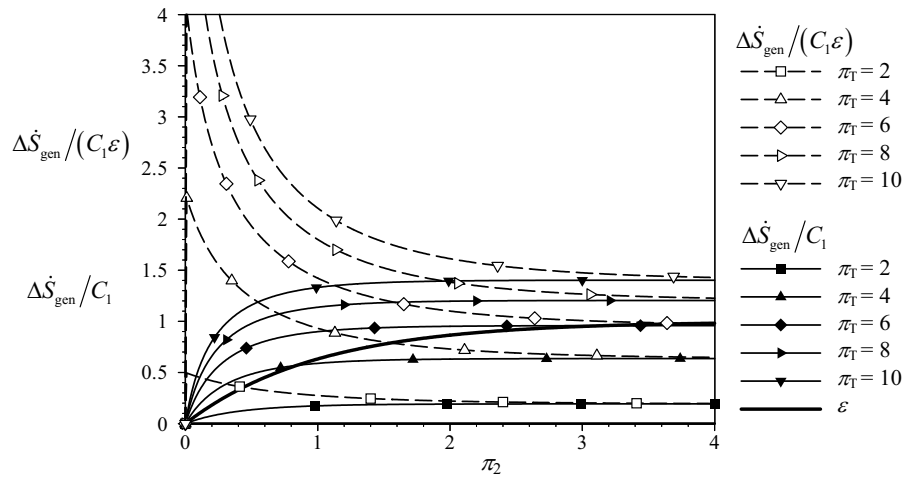
Sl. 3. Brezrazsežno povečanje entropije v sotočnem prenosniku toplote v odvisnosti od π_2 in π_3 pri $\pi_T = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ in $1,0$ kot parametri

Fig. 3. Non-dimensional entropy generation of a parallel-flow heat exchanger as a function of π_2 and π_3 with $\pi_T = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ and 1.0 as parameters

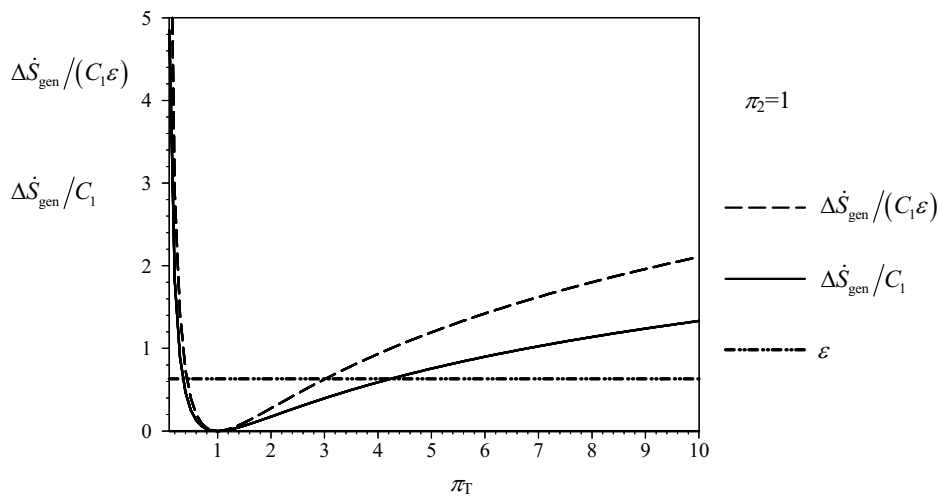


Sl. 4a. Brezrazsežno povečanje entropije in razmerje brezrazsežnega povečanja entropije s toplotnim izkoristkom v odvisnosti od π_2 in parametrične krivulje $\pi_T = 0,2$ do $1,0$ za $\pi_3 = 0$

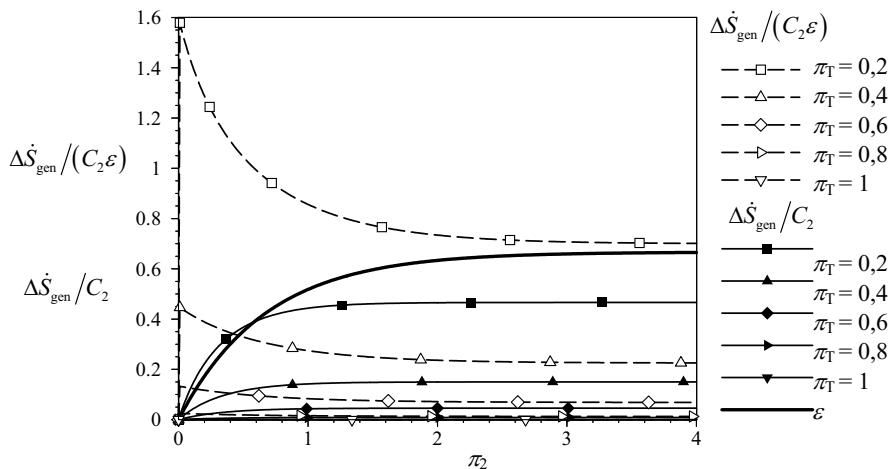
Fig. 4a. Non-dimensional entropy generation and the ratio of non-dimensional entropy generation to heat transfer effectiveness as a function of π_2 and the parametric curves $\pi_T = 0.2$ to 1.0 for $\pi_3 = 0$



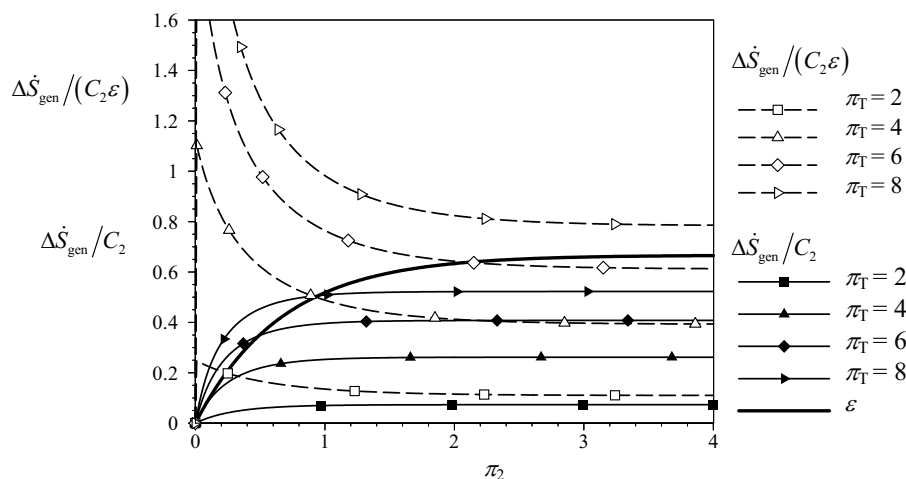
Sl. 4b. Brezrazsežno povećanje entropije in razmerje brezrazsežnega povečanja entropije s toplotnim izkoristkom v odvisnosti od π_2 in parametrične krivulje $\pi_T = 2,0$ do $10,0$ za $\pi_3 = 0$
 Fig. 4b. Non-dimensional entropy generation and the ratio of non-dimensional entropy generation to heat transfer effectiveness as a function of π_2 and the parametric curves $\pi_T = 2.0$ to 10.0 for $\pi_3 = 0$



Sl. 5. Brezrazsežno povečanje entropije in razmerje brezrazsežnega povečanja entropije s toplotnim izkoristkom v odvisnosti od π_T za $\pi_2 = 1,0$ in $\pi_3 = 0$
 Fig. 5. Non-dimensional entropy generation and the ratio of non-dimensional entropy generation to heat transfer effectiveness as a function of π_T for $\pi_2 = 1.0$ and $\pi_3 = 0$

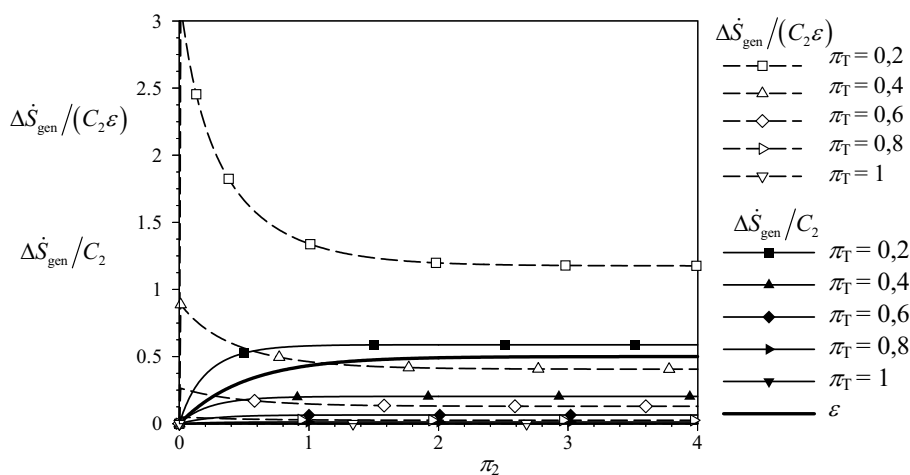


Sl. 6. Brezrazsežno povečanje entropije in razmerje brezrazsežnega povečanja entropije s toplotnim izkoristkom v odvisnosti od π_2 in parametrične krivulje $\pi_T = 0,2$ do $1,0$ za $\pi_3 = 0,5$
 Fig. 6. Non-dimensional entropy generation and the ratio of non-dimensional entropy generation to heat transfer effectiveness as a function of π_2 and the parametric curves $\pi_T = 0.2$ to 1.0 for $\pi_3 = 0.5$



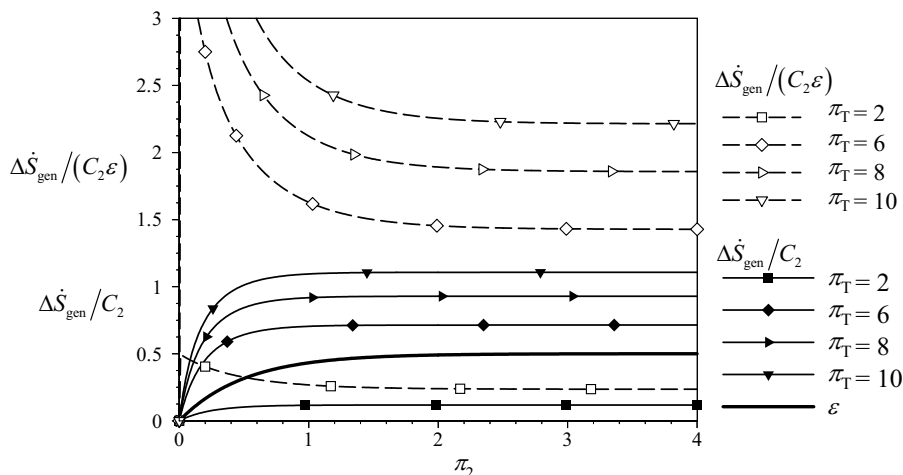
Sl. 7. Brezrazsežno povečanje entropije in razmerje brezrazsežnega povečanja entropije s toplotnim izkoristkom v odvisnosti od π_2 in parametrične krivulje $\pi_T = 2,0$ do $10,0$ za $\pi_3 = 0,5$

Fig. 7. Non-dimensional entropy generation and the ratio of non-dimensional entropy generation to heat transfer effectiveness as a function of π_2 and the parametric curves $\pi_T = 2.0$ to 10.0 for $\pi_3 = 0.5$



Sl. 8. Brezrazsežno povečanje entropije in razmerje brezrazsežnega povečanja entropije s toplotnim izkoristkom v odvisnosti od π_2 in parametrične krivulje $\pi_T = 0,2$ do $1,0$ za $\pi_3 = 1,0$

Fig. 8. Non-dimensional entropy generation and the ratio of non-dimensional entropy generation to heat transfer effectiveness as a function of π_2 and the parametric curves $\pi_T = 0.2$ to 1.0 for $\pi_3 = 1.0$



Sl. 9. Brezrazsežno povečanje entropije in razmerje brezrazsežnega povečanja entropije s toplotnim izkoristkom v odvisnosti od π_2 in parametrične krivulje $\pi_T = 2,0$ do $10,0$ za $\pi_3 = 1,0$

Fig. 9. Non-dimensional entropy generation and the ratio of non-dimensional entropy generation to heat transfer effectiveness as a function of π_2 and the parametric curves $\pi_T = 2.0$ to 10.0 for $\pi_3 = 1.0$

2.1 Razlaga diagramov

Prostorski diagrami na slikah 2 in 3 povedo, da povečanje entropije pri določeni vrednosti π_T praktično doseže svoje asimptotične vrednosti, kadar π_2 postane večji od ena. Te asimptotske vrednosti so podane z enačbami (11) in (12). Lahko tudi vidimo, da se brezrazsežno povečanje entropije zmanjša s povečanjem π_T med 0 in 1,0. Za $\pi_T = 1,0$ ni povečanja entropije. (To je razumljivo, saj sta pri $\pi_T = 1,0$ temperaturi vstopnih pretokov enaki, kar pomeni nespremenljivost entropije). Seveda novo povečanje π_T prek vrednosti 1 pomeni povečanje entropije.

Nespremenljivost entropije velja za vsak π_T , če je $\pi_3 = 0$. Zato definirano brezrazsežno povečanje entropije $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_2$ ni primerno za reševanje tega posebnega primera, saj daje nedoločeno vrednost $0 \cdot \infty$ za $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}$. Rešitev takega primera kažejo diagrami na slikah 4a, 4b in 5, ki so dobljeni z uporabo enačb (16), (18) in (19). Prekinjane črte v diagramih podajajo vrednosti $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ in polne črte ustrezno $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$.

Zanimivo je pripomniti o spremembi vrednosti $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$. Vidimo, da se vsaka krivulja za dano vrednost π_T monotonno zniža od vrednosti za $\pi_2 = 0$ do asimptotične vrednosti (vodoravna asimptota), če $\pi_2 \rightarrow \infty$. Izračunane so iz enačbe (18). Če $\pi_2 = 0$, tj. $C_2 \rightarrow \infty$ vstavimo v (18), dobimo nedoločeno vrednost $0/0$. Z uporabo L'Hospitalovega pravila zlahka pokažemo, da je:

$$\frac{\Delta\dot{S}_{\text{gen}}}{\varepsilon C_1}(\pi_2 = 0) = \frac{(\pi_T - 1)^2}{\pi_T} \quad (20).$$

Kaj pravzaprav predstavlja desna stran enačbe (20)? Odgovor zlahka dobimo, če zapišemo enačbo brezrazsežne spremembe entropije zaradi menjave toplote pri različnih temperaturah, na različnih prenosnih površinah:

$$d\dot{S}_{\text{gen}} = \frac{(T_1 - T_2)^2}{T_1 T_2} k \, dA \quad (21).$$

Z vstavitvijo $T_1 = T_1' = \text{konst.}$ in $T_2 = T_2' = \text{konst.}$ v (21), ob uporabi (9), postane prvi člen na desni strani (21) povsem enak desni strani (20). To pomeni, da enačba (20) dejansko predstavlja največje povečanje entropije, ki je neposredno povezano z vstopnima temperaturama obeh pretokov. Praktično uporabo tega najdemo v prenosnikih toplote, kjer oba pretoka prestaneta fazni premeni. Tam imata tokova neskončno toplotno zmogljivost, saj eden kondenzira in se drugi uparja.

Asimptotično vrednost $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ na slikah 4a in 4b dobimo z vstavitvijo $\pi_2 \rightarrow \infty$ v enačbo (18):

$$\frac{\Delta\dot{S}_{\text{gen}}}{\varepsilon C_1}(\pi_2 \rightarrow \infty) = \ln(\pi_T) + \frac{1 - \pi_T}{\pi_T} \quad (22).$$

2.1 Interpretation of the diagrams

The three-dimensional diagrams in Figure 2 and 3 indicate that the entropy generations for given values of π_T effectively reach their asymptotic values when π_2 becomes larger than one. These asymptotic values are quantified by Equations (11) and (12). It can be seen that the non-dimensional entropy generation becomes smaller with the rise of π_T from 0 to 1.0. For $\pi_T = 1.0$ the entropy generation is zero. (This is physically justified because for $\pi_T = 1.0$ the inlet temperatures of the flows are equal, thus yielding no entropy generation). However, further increasing π_T above the value of 1 increases the entropy generation again.

The entropy generation is zero for each π_T when $\pi_3 = 0$. Thus, the defined non-dimensional entropy generation $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_2$ is not suitable for the solution of this special case because it gives the undefined value $0 \cdot \infty$ for $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}$. The solution of this problem is presented in the diagrams in Figure 4a, 4b and 5, obtained by using Equations (16), (18) and (19). The dotted lines in the diagrams give the values of $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$, and the full lines the ones of $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$.

It is interesting to note the change of the value $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$. It is clear that each curve for a given value of π_T drops monotonously from the value for $\pi_2 = 0$ to the asymptotic value (horizontal asymptote), when $\pi_2 \rightarrow \infty$. They are calculated from Equation (18). If $\pi_2 = 0$, i.e. $C_2 \rightarrow \infty$ is inserted into (18), the undefined form $0/0$ is obtained. Using the L'Hospital rule it is easily shown that:

What is actually represented on the right-hand side of Equation (20)? The answer is easily obtained by establishing the non-dimensional equation of entropy generation due to heat exchange at different temperatures on a differential exchange surface area:

By inserting $T_1 = T_1' = \text{const.}$ and $T_2 = T_2' = \text{const.}$ into (21), and by using (9), the first term on the right-hand side of (21) becomes identical to the right-hand side of (20). This means that equation (20) in fact represents the maximum entropy generation, which is directly related to the inlet temperatures of both flows. The practical application of this may be found in heat exchangers, where both flows undergo a phase change. There the flows have an infinite heat capacity because one condenses and the other evaporates.

The asymptotic value of $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ in Figure 4a and 4b are obtained by inserting $\pi_2 \rightarrow \infty$ into Equation (18):

Diagram na slici 5 predstavlja brezzrasežno spremembo entropije $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ in $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ v odvisnosti od π_T za $\pi_2 = 1,0$ in $\pi_3 = 0$. Jasno se vidi iz diagrama, ob rasti π_T v območju $0 < \pi_T < 1$ se obe izračunane vrednosti strmo znižata in se izničita pri $\pi_T = 1$. Za $\pi_T > 1$ je povečanje izračunane vrednosti počasnejše, saj se sprememba entropije $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ nagiba v neskončnost, ko se π_T nagiba k nič ali v neskončnost. To zlahka dokažemo z analizo enačbe (16). Kadar prenosnik toplote deluje v območju $0 < \pi_T < 1$, rahel upad π_T bistveno poveča entropijo. Čeprav so bili diagrami na slikah 4a, 4b in 5 izdelani z enačbami, ki veljajo za sotočne prenosnike toplote, so iste rešitve veljavne tudi za protitočne in križne prenosnike toplote, saj je $\pi_3 = 0$.

Diagrami na slikah 6 in 7 dajejo brezzrasežne vrednosti $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ in $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ v odvisnosti od π_2 za $\pi_3 = 0,5$. Na slici 6 so narisane krivulje za $\pi_T = 0,2$ do $1,0$, na slici 7 pa za $\pi_T = 2,0$ do $10,0$. Na obeh diagramih so krivulje izkoristka

$$\varepsilon = \pi_1 = \frac{2}{3}(1 - \exp(-1,5\pi_2)) \quad (23)$$

prav tako narisane.

V obeh primerih kažejo diagrami, da se pri takšnih prenosnikih toplote pojavi največja vrednost izkoristka, praktično pri $\pi_2 = 3,0$ ($\varepsilon = 0,659$). Nadaljnje večanje π_2 pomeni povečanje entropije, ob zanemarljivem izboljšanju izkoristka.

Nazadnje, diagrami na slikah 8 in 9 kažejo brezzrasežne vrednosti $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ in $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ v odvisnosti od π_2 za $\pi_3 = 1,0$ oziroma vrednosti parametrov $\pi_T = 0,2$ do $1,0$ in $\pi_T = 2,0$ do $10,0$. Krivulja izkoristka

$$\varepsilon = \pi_1 = \frac{1}{2}(1 - \exp(-2\pi_2)) \quad (24)$$

je prav tako vnesena v diagramih.

Slike jasno kažejo, da je povečanje entropije zelo blizu svoje asimptotične vrednosti pri $\pi_2 = 2,5$. Nadaljnje večanje π_2 daje enakomerno rast entropije ob zanemarljivem vplivu na izboljšanje izkoristka. Glede na sliko 8 smemo poudariti, da povečanje π_T v območju $0,2$ do $0,8$ enakomerne rasti entropije pomeni bistven vpliv na povečanje ε v širokem območju spremenljivke π_2 . Po slici 9 velja podoben izrek za zmanjšanje π_T od $10,0$ do $2,0$.

3 SKLEP

Izvedena analiza entropije sotočnih prenosnikov toplote je dokazala, da povečanje entropije lahko podamo z istimi brezzrasežnimi veličinami π_1 , π_2 in π_3 , kakor pri energijski analizi, z dodatnim brezzrasežnim številom π_T . Entropijska analiza kaže neposredno povezanost med izkoristkom ε in povečanjem entropije. Prikazali smo,

The diagram in Figure 5 presents the non-dimensional entropy generations $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ and $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ as a function of π_T for $\pi_2 = 1.0$ and $\pi_3 = 0$. It is clear from the diagram that for π_T rising in the interval $0 < \pi_T < 1$, both the ordinate values drop steeply and become zero for $\pi_T = 1$. For $\pi_T > 1$ the rise of the ordinate values is slower because the entropy generation $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ tends to infinity when π_T tends to zero or to infinity. This is easily proven by analysing Equation (16). If the heat exchanger is operated in the range $0 < \pi_T < 1$, a slight decrease of π_T significantly increases the entropy generation. Although the diagrams in Figure 4a, 4b and 5 were obtained according to the equations for parallel-flow heat exchangers, the same solutions are valid for counter-flow and cross-flow heat exchangers because of $\pi_3 = 0$.

The diagrams in Figure 6 and 7 represent the non-dimensional values $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ and $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ as functions of π_2 for $\pi_3 = 0.5$. In Figure 6 the curves for $\pi_T = 0.2$ to 1 are plotted, and in Figure 7 for $\pi_T = 2.0$ to 10.0 . In both diagrams the curve for the effectiveness:

is also drawn.

For both cases the diagrams indicate that for such heat exchangers the maximum effectiveness value is practically achieved for $\pi_2 = 3.0$ ($\varepsilon = 0.659$). A further increase of π_2 only results in entropy generation, with an insignificant improvement of the effectiveness.

Finally, the diagrams in Figure 8 and 9 represent the non-dimensional values $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/C_1$ and $\Delta\dot{S}_{\text{gen}}/(\varepsilon C_1)$ as functions of π_2 , for $\pi_3 = 1.0$ and parametric values of $\pi_T = 0.2$ to 1.0 and $\pi_T = 2.0$ to 10.0 respectively. The effectiveness curve:

is also plotted in the diagrams.

The figures clearly indicate that the entropy generations are very close to their asymptotic values for $\pi_2 = 2.5$. A further increase of π_2 yields constant entropy generation with negligible influence on the improvement of effectiveness. Referring to Figure 8, it should be emphasized that increasing π_T in the range 0.2 to 0.8 the constant entropy generation has a significant influence on the increase of ε in a wide range of the variable π_2 . According to Figure 9, the same can be said for decreasing π_T from 10.0 to 2.0 .

3 CONCLUSION

The performed entropy analysis of parallel-flow heat exchangers has proven that entropy generation can be represented using the same non-dimensional characteristics π_1 , π_2 and π_3 , used in the energy analysis, and the additional non-dimensional number π_T . The entropy analysis reveals a direct connection between the effectiveness ε and the

da je povećanje entropije veliko, kadar je razlika med toplotnima zmogljivostima obeh pretokov velika. Največja je, kadar en pretok spremeni fazo ($\pi_3 = 0$), ter najmanjša kadar sta toplotni zmogljivost enaki ($\pi_3 = 1$). Razmere so prav nasprotno glede izkoristka ε prenosa toplote. Prav tako je prikazano, da za $0 < \pi_3 < 1$ povečanje brezrazsežne značilnice menjalne površine $\pi_2 = kA_0/C_1$ učinkuje samo do določene vrednosti, nato pa se entropija le povečuje ob praktično nespremenljivem izkoristku.

Brezrazsežne značilnice π_1, π_2 in π_3 , uporabljene v tem prispevku, je uvedel že Bošnjaković za svoje energijske izračune prenosnikov toplote. Sedanji način izračuna entropije z uporabo dodatne značilnice π_T dodaja več splošnosti pri problemih sotočnih prenosnikov toplote.

entropy generation. It was shown that the entropy generation is large when the difference between the heat capacities of the heat exchanging flows is big. It is largest when one of the flows changes its phase ($\pi_3 = 0$), and smallest when the flow heat capacities are equal ($\pi_3 = 1$). The situation is just the opposite for the heat-transfer effectiveness ε . Further, it was shown that for $0 < \pi_3 < 1$, increasing the non-dimensional exchanger area characteristic $\pi_2 = kA_0/C_1$ is useful only to a limited value, after which only entropy is produced with a practically constant effectiveness.

The non-dimensional characteristics π_1, π_2 and π_3 used in this paper were introduced by Bošnjaković for his energy calculation of heat exchangers. This approach to the entropy calculation, using the additional characteristic π_T , adds more generality to the problem of parallel heat-exchanger analysis.

4 OZNAKE 4 NOMENCLATURE

površina toplotne menjave	A	m ²	heat-exchange surface area
specifična toplota pri p =konst. šibkejšega oz. močnejšega pretoka	c_{p1}, c_{p2}	J/(kg K)	specific heat capacity at p =const. of the weaker and stronger flow respectively
toplotna zmogljivost šibkejšega oz. močnejšega pretoka	C_1, C_2	W/K	heat capacity of the weaker and stronger flow respectively
izkoristek prenosnika toplote	ε	-	heat-exchanger effectiveness
celotni količnik prenosa toplote	k	W/(m ² K)	overall heat-transfer coefficient
brezrazsežno razmerje šibkejšega oz. močnejšega pretoka vstopne temperature	π_T	-	non-dimensional relation of the weaker and stronger flow input temperatures
brezrazsežna temperaturna značilnica prenosnika toplote	π_1	-	non-dimensional temperature characteristic of the heat exchanger
brezrazsežna površinska značilnica prenosnika toplote	π_2	-	non-dimensional heat-exchanger area characteristic
brezrazsežna značilnica razmerja zmogljivosti šibkejšega oz. močnejšega pretoka	π_3	-	non-dimensional characteristic of the weaker and stronger flow heat-capacity ratio
pretočna količina šibkejšega oz. močnejšega pretoka	q_{m1}, q_{m2}	kg/s	mass flow rate of the weaker and stronger flow respectively
celotno povečanje entropije v prenosniku toplote	$\Delta \dot{S}_{gen}$	W/K	overall entropy generation of the heat exchanger
absolutna vstopna in izstopna temperatura šibkejšega pretoka	T_1', T_1''	K	absolute input and output temperatures of the weaker flow
absolutna vstopna in izstopna temperatura močnejšega pretoka	T_2', T_2''	K	absolute input and output temperatures of the stronger flow

5 LITERATURA 5 REFERENCES

- [1] Bejan, A. (1996) Entropy generation minimization, *CRC Press*, New York..
- [2] Bejan, A. (1988) Advanced engineering thermodynamics, *John Wiley & Sons*, New York.
- [3] Guo, Z.Y., S. Zhou, Z. Li, L. Chen (2001) Theoretical analysis and experimental confirmation of the uniformity principle of temperature difference field in heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (10), 2119-2127
- [4] Can, A., E. Buyruk, D. Eriner (2002) Exergoeconomic analysis of condenser type heat exchanger, *Exergy, an International Journal* 2, 113-118
- [5] Bošnjaković, F. (1950) Nauka o toplini, dio prvi, *Tehnička knjiga*, Zagreb.
- [6] Galović, A. (1997) Nauka o toplini II, Sveučilište u Zagrebu, *Fakultet strojarstva i brodogradnje*, Zagreb.

Naslovi avtorjev: prof.dr. Antun Galović
prof.dr. Mladen Andrassy
Fakulteta za strojništvo in
ladjedelništvo
Univerza v Zagrebu
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb, Hrvatska
antun.galovic@fsb.hr
mladen.andrassy@fsb.hr

dr. Marija Živić
Fakulteta za strojništvo v Sl. Brodu
Univerza v Osijeku

Authors' Address: Prof.Dr. Antun Galović
Prof.Dr. Mladen Andrassy
Faculty of Mechanical Eng. and
Naval Architecture
University of Zagreb
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb, Hrvatska
antun.galovic@fsb.hr
mladen.andrassy@fsb.hr

Dr. Marija Živić
Faculty of Mech. Eng. Sl. Brod
University of Osijek

Prejeto: 7.10.2002
Received:

Sprejeto: 29.5.2003
Accepted:

Odprt za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Izbrani vidiki celovitosti površine aluminijeve zlitine pri običajni in obdelavi z velikimi hitrostmi: Spremembe mikrotrdote in hrapavosti površine

Selected Aspects of the Surface Integrity of Aluminium Alloy in High-Speed Machining: Microhardness Variations and Surface Roughness

David Vaněček - Jan Mádl - Mirko Soković

Prispevek se ukvarja s kakovostjo in celovitostjo površine aluminijeve zlitine, nastale pri običajni in obdelavi z velikimi hitrostmi (VHO). V študiji so uporabljena orodja iz karbidne trdine skupine K. Predstavljeni so rezultati analize mikrotrdote in hrapavosti površine. Meritve mikrotrdote so izvedene tik pod obdelano površino. Analize obdelane površine so predstavljene v območju parametrov hrapavosti površine. Razmerja med spremembami mikrotrdote in hrapavostjo površine so dobljene iz analiz.

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: zlitine Al, obdelave visokohitrostne, integriteta površin, hrapavost površin, mikrotrdota)

This paper deals with the quality and integrity of the surface produced during aluminium-alloy high-speed machining (HSC). Carbide type-K tools were used in this study. The results of the microhardness and surface-roughness analyses are presented. The microhardness measurements were conducted beneath the machined surface. The analyses of the surface produced are presented in a range of surface-roughness parameters. Relations between microhardness variations and surface roughness were obtained from the analyses.

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: Aluminium alloys, high speed machining, surface integrity, surface roughness, microhardness)

0 UVOD

Parametri, ki se nanašajo na celovitost obdelane površine, so odločilni pri delovanju površine različnih delov. Celovitost površine je zbirka značilnosti, ki opisuje funkcionalne lastnosti površine. To pomeni, da celovitost površine ne popisuje samo topološki vidik površin ter njihove fizikalne in kemične lastnosti, temveč tudi mehanske in metalurške lastnosti in značilnosti. Zapletena teoretična in eksperimentalna raziskava še ni bila do sedaj opravljena za obdelavo z veliko hitrostjo. Seveda lahko eksperimentalno raziskavo podpremo s simulacijo, z uporabo ustrezne programske opreme za simulacijo. Eksperimentalna raziskava, ki temelji na izbranih vidikih obdelave z veliko hitrostjo, je bila opravljena na Češki tehnični univerzi (ČTU) v Pragi. Več poročil o mikrotrdoti in hrapavosti površine, nastalih na površini obdelovanca med obdelovanjem z veliko hitrostjo, je bilo v zadnjem obdobju objavljenih v literaturi ([1] do [10]).

0 INTRODUCTION

Parameters that are related to the integrity of a machined surface are decisive when it comes to the functioning of surface components. The integrity of any surface is a collection of the characteristics that describe the functioning property of the surface. This means that surface integrity describes not only the topological aspects of the surfaces and their physical and chemical properties, but also their mechanical and metallurgical properties and characteristics. Complex theoretical and experimental research has not yet been carried out for high-speed machining. However, experimental research can be supported by simulations using suitable software for these simulations. Complex experimental research on selected aspects of HSC is the object of the research being carried out at the Czech Technical University (CTU) in Prague. Several reports on the microhardness and surface roughness induced on workpiece surfaces during high-speed machining have appeared in the literature ([1] to [10]).

1 EKSPERIMENTALNO DELO

Obdelava z veliko hitrostjo aluminijeve zlitine, brez hlajenja, je bila opravljena z uporabo rezalnih orodij iz karbidne trdine skupine K, na obdelovalnem stroju Taimac – ZPS Zlín MCFV 5050LN. Kot obdelovani material je bila uporabljena aluminijeve zlitina Al 7075. Lastnosti obdelovanega materiala sta bili: natezna trdnost 480 MPa, meja elastičnosti 390 MPa. Postopek predelave zajema valjanje z raztopnim žarjenjem, toplotno obdelavo, gašenje (1,5 do 3 % nadzorovani raztezki), stopenjsko staranje, brez utrjevanja po raztezanju.

Rezalni parametri: Rezalna hitrost je bila od 200 do 1600 m/min, podajanje na zob orodja $f = 0,1$ mm, globina rezanja $a_p = 1$ mm.

Pri vseh preizkusih je bila uporabljena nova frezalna glava FRU90 11335 in izmenljive ploščice iz karbidne trdine skupine K ADMX 12T 306ER, proizvajalca Fette, ZRN. Premer frezalne glave je bil 63 mm.

Za merjenje parametrov hrapavosti površine je bila uporabljena naprava Taylor-Hobson, za merjenje mikrotrdote pa merilnik mikrotrdote z video merilnim sistemom.

2 REZULTATI EKSPERIMENTALNEGA DELA IN RAZPRAVA

2.1 Analiza hrapavosti površine

Dve vrsti parametrov je bilo izmerjenih. Najprej parametri hrapavosti površine R_a , R_q , R_y , R_{tm} , R_v , R_p , S_m , Δq , R_{sk} , R_{ku} , S , R_{3Z} , R_{pm} , R_{3y} , nato pa še parametri valovitosti W_a , W_q , W_t , W_v , W_p , Δq . Da bi izpolnili statistično verodostojnost, smo vse parametre izmerili po petkrat na vseh vzorcih. Analiza rezultatov, podana na sliki 1 (a, b), kaže spremembe parametrov hrapavosti površine in valovitosti za različne rezalne hitrosti.

Slika 1 (a, b) kaže obstoj dveh najmanjših vrednosti (pri rezalnih hitrostih 600 in 1200 m/min) pri večini izbranih parametrov. Ti dve vrednosti, ki jih opazimo pri približno enakih hitrostih, nista razločljivi z vibracijami stroja. Vibracije glavnega vretena so bile prav tako analizirane. Izbrani rezultati so predstavljeni na sliki 2 pri rezalni hitrosti 500 m/min oz. 1000 m/min.

2.2 Analiza mikrotrdote obdelane površine

Lastnosti površine obdelovanca so močno odvisne od krivulje mikroutrjevanja. Oblika krivulje mikroutrjevanja ima lahko pozitiven ali negativen vpliv na kakovost površine. Globina in lastnosti mehansko utrjene plasti so odvisne od dejavnikov, to so: uporabljena metoda predelave, trenje pri drsenju, ki mu je bila površina izpostavljena, pa tudi material obdelovanca.

1 EXPERIMENTAL WORK

Dry aluminium-alloy high-speed machining was performed using carbide type-K cutting tools on a Taimac – ZPS Zlín MCFV 5050LN machine tool. The aluminium alloy Al 7075 was used as the workpiece material. The properties of the workpiece material were: tensile strength 480 MPa, and proof stress 390 MPa. The method of production was rolled with solution, heat-treated, quenched. 1.5 to 3% controlled stretched and step aged, not straightened after stretching.

The cutting specifications were: cutting speed, from 200 to 1600 m/min; the feed per tooth, $f = 0.1$; the depth of cut, $a_p = 1$ mm.

For all the experimental work we used a new tool and inserts manufactured by Fette: Milling cutter FRU90 11335 with ADMX 12T 306ER chips. The chips were made of Type-K carbide. The cutter diameter was 63 mm.

A Taylor-Hobson device was used for measuring the surface-roughness parameters, and a microhardness tester with a video measuring system used for the microhardness measurements.

2 EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

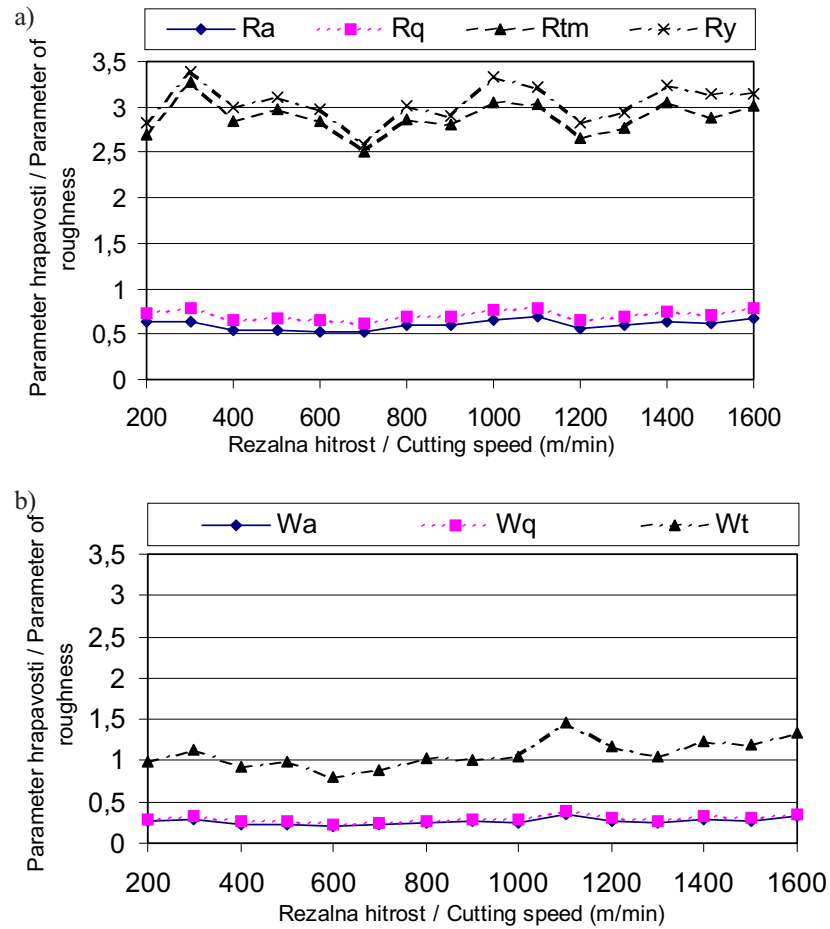
2.1 Surface-roughness analysis

Two kinds of parameters were measured. First, the surface-roughness parameters R_a , R_q , R_y , R_{tm} , R_v , R_p , S_m , Δq , R_{sk} , R_{ku} , S , R_{3Z} , R_{pm} , R_{3y} . Then, the waviness parameters W_a , W_q , W_t , W_v , W_p , Δq . For the purposes of statistical verification, the parameters were measured five times for all the samples. An analysis of the results presented in Fig. 1 (a, b) shows the changes in the surface-roughness parameters (Fig. 1 - a) and the parameters of waviness (Fig. 1 - b) for different cutting speeds.

Fig. 1 (a, b) show that two minima exist (600, 1200 m/min cutting speed) for most of the selected parameters. These two minima, which are observed at approximately the same speeds, cannot be explained by machine vibrations. The machine spindle vibrations were also analysed. Selected results are presented in Fig. 2 – a, 500 m/min, and Fig. 2 – b, 1000 m/min cutting speed.

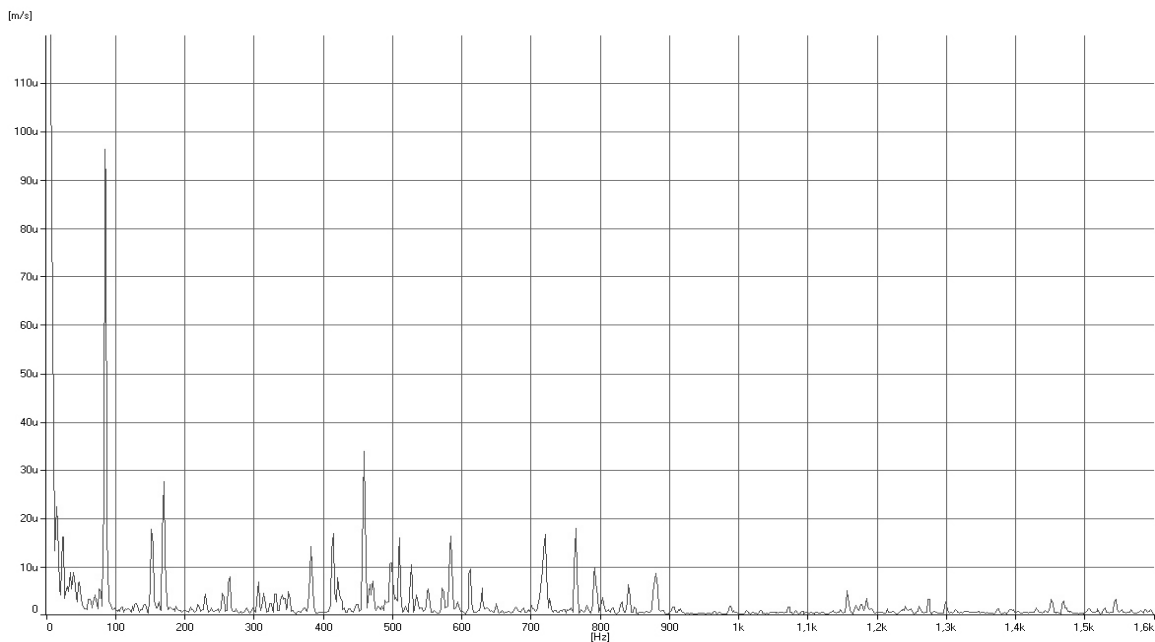
2.2 Microhardness analysis of the produced surface

The properties of the surface of the workpiece depend considerably on the microhardening curve. The shape of the microhardening curve can have a positive or negative influence on surface quality. The depth and properties of the work-hardened layer depend on factors such as the processing method used, the frictional sliding to which the surface was subjected and also the workpiece material.



Sl. 1. Hrapavost površine (a) in valovitost (b) za površine, obdelane pri rezalnih hitrostih od 200 do 1600 m/min

Fig. 1. Surface-roughness (a) and waviness (b) variations for a surface produced at cutting speeds from 200 to 1600 m/min



Sl. 2. Autospekter vibracij glavnega vretena

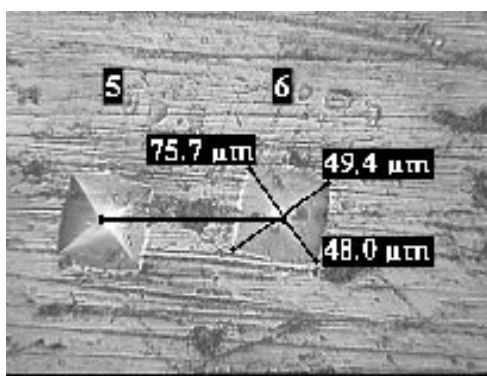
Fig. 2. Autospectrum - relation between amplitude of velocity (m/s) and frequency (Hz)

Obseg sprememb mikrostrukture pod površino ter spremembe mikrotrdote v površinski plasti so bile tudi merjene. Slika 3 prikazuje praktičen primer merjenja mikrotrdote, slika 4 pa podrobno ponazarja spremembe mikrotrdote v globino pod obdelano površino, nastalo pri različnih rezalnih hitrostih: (a) 200, 400 in 500 m/min; (b) 600, 800 in 900 m/min; (c) 1000, 1100 in 1300 m/min; (d) 1400, 1500 in 1600 m/min.

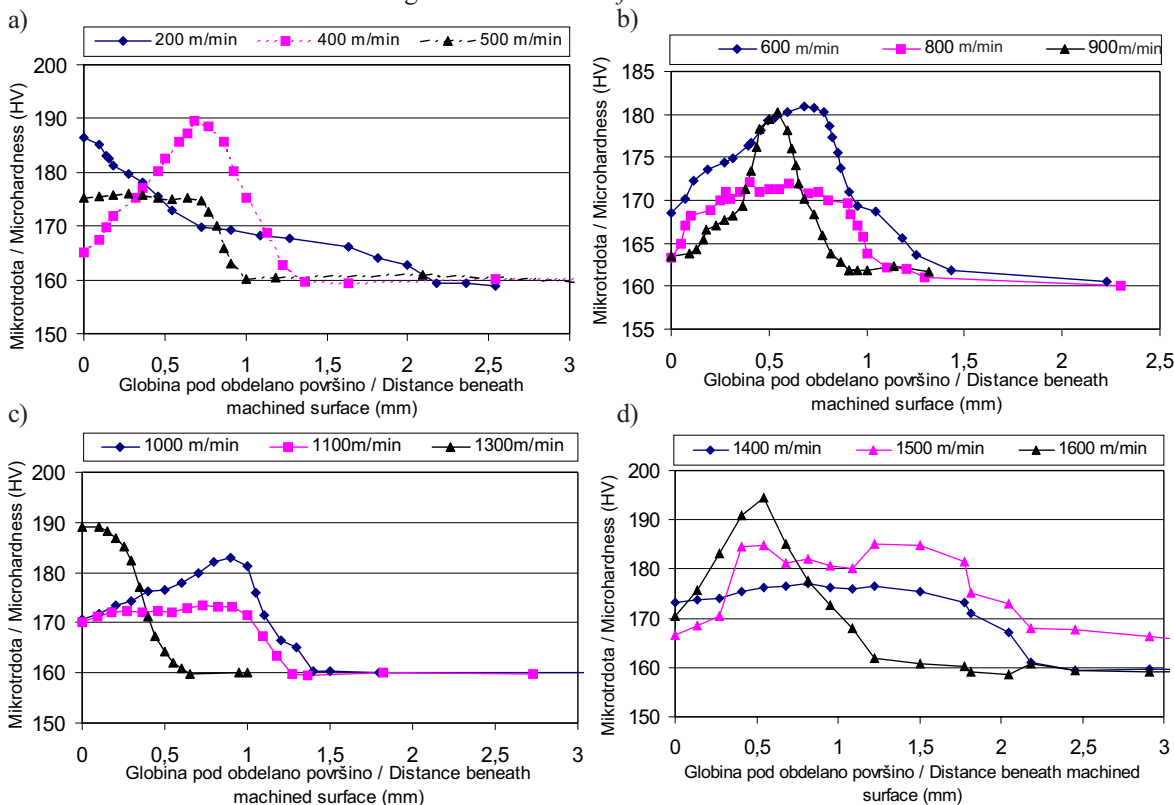
Za stopnjo mehanskega utrjevanja K_z (ki je lahko izračunana iz povprečnih vrednosti (sl. 5 a), oziroma iz največjih vrednosti (sl. 5 b)), lahko vzamemo, da je:

The extent of the changes in the subsurface microstructure and the subsurface microhardness were measured. Figure 3 shows the measurements of microhardness. Figure 4 details the variations in the microhardness with depth beneath the machined surface produced by different cutting speeds (Figure 4 – a: 200, 400 and 500 m/min; 4 – b: 600, 800 and 900 m/min; 4 – c: 1000, 1100 and 1300 m/min; 4 – d: 1400, 1500 and 1600 m/min).

Fig. 5 Rate of the work hardening K_z , which can be assumed to be:



Sl. 3. Merjenje mikrotrdote
Fig. 3. Measurement of microhardness



Sl. 4. Spremembe mikrotrdote pod obdelano površino, nastalo pri različnih rezalnih hitrostih:

- a) $v_c = 200, 400, \text{ in } 500 \text{ m/min}$; b) $v_c = 600, 800, \text{ in } 900 \text{ m/min}$;
c) $v_c = 1000, 1100, \text{ in } 1300 \text{ m/min}$; d) $v_c = 1400, 1500, \text{ in } 1600 \text{ m/min}$

Fig. 4. Microhardness variations beneath the surface produced at different cutting speeds:

- a) $v_c = 200, 400, 500 \text{ m/min}$; b) $v_c = 600, 800, 900 \text{ m/min}$;
c) $v_c = 1000, 1100, 1300 \text{ m/min}$; d) $v_c = 1400, 1500, 1600 \text{ m/min}$

$$K_z = \frac{HV_z - HV_o}{HV_o} \times 100 (\%)$$

pri čemer pomenita:

HV_z - mikrotrdoto mehansko utrjenega materiala,
 HV_o - mikrotrdoto začetnega (neutrjenega) materiala.

Slika 6 prikazuje celotno globino utrjevanja za različne rezalne hitrosti od 200 do 1600 m/min. Slika 7 podaja podrobno analizo globine največjega utrjevanja za različne rezalne hitrosti od 200 do 1600 m/min. Slika 8 podrobno prikazuje spremembe vrednosti največjega utrjevanja pri posameznih rezalnih hitrostih od 200 do 1600 m/min. Celovita smer utrjevanja v izbranih diagramih je prikazana s pikčasto in črtno črto v teh diagramih.

Koeficient celotnega utrjevanja, prikazanega na sliki 9, lahko določimo kot:

$$k = \frac{1}{100} \times \sum_{i=1}^n (HV_{xi} \times \Delta)$$

pri čemer pomenijo:

HV_{xi} – povprečno vrednost mikrotrdote,
 Δ – širino stolpca,
 n – število stolpcev, upoštevanih pri izračunu.

where are:

HV_z – microhardness of the work-hardened material
 HV_o – microhardness of the non-work-hardened material

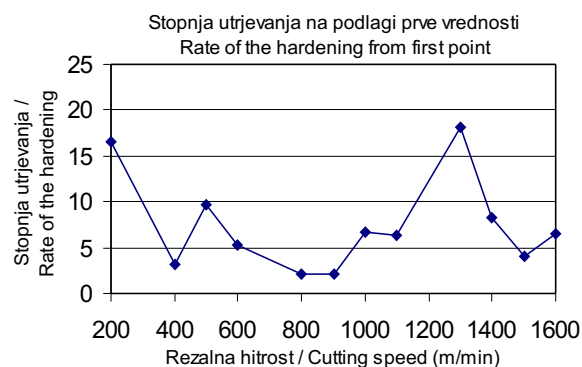
Fig. 6 analyses of the total depth of hardening for different cutting speeds 200 to 1600 m/min. Fig. 7 provides a detailed analysis of the depth of the maximum hardening for different cutting speeds 200 to 1600 m/min. Fig. 8 details the variations of the maximum hardening values for different cutting speeds 200 to 1600 m/min. The overall tendency for the selected graphs is shown by the thin line in the graphs.

The coefficient of total hardening presented in Fig. 9 can be assumed to be:

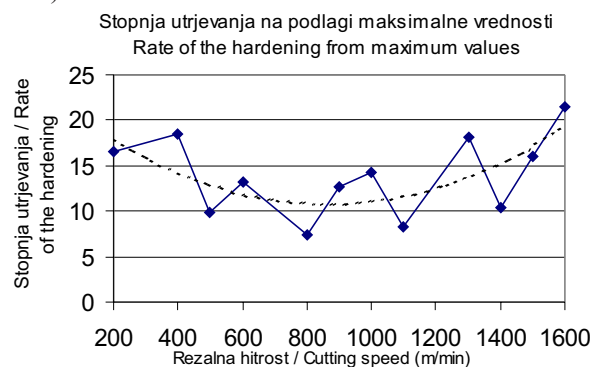
where are:

HV_{xi} – mean values of microhardness,
 Δ – width of column,
 n – number of columns taken into account.

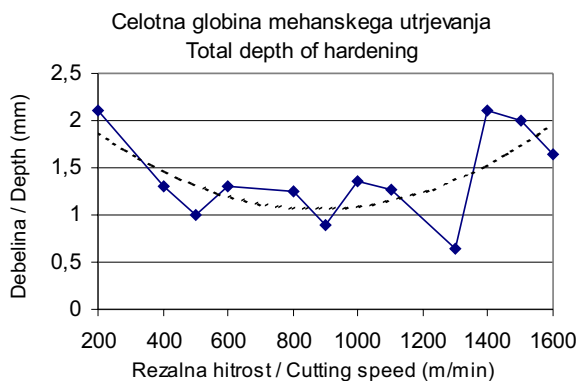
a)



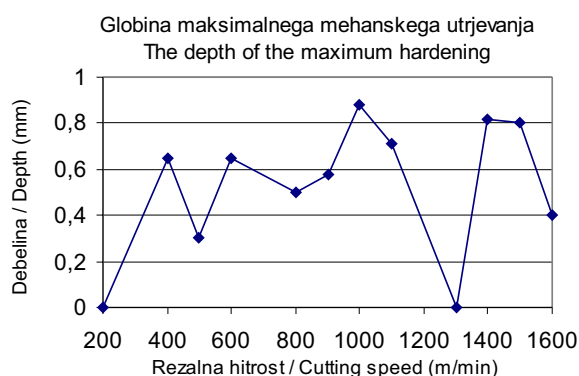
b)



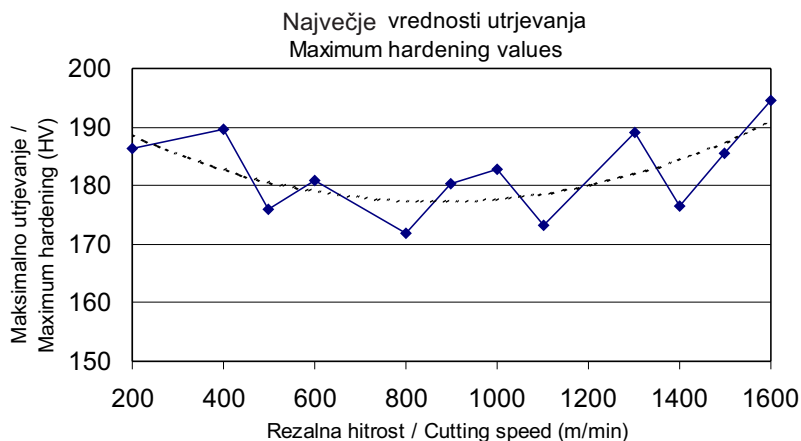
Sl. 5. Stopnja mehanskega utrjevanja na podlagi prve vrednosti (a) in na podlagi maksimalne vrednosti (b)
 Fig. 5. Rate of work hardening (a) and rate of maximum values (b)



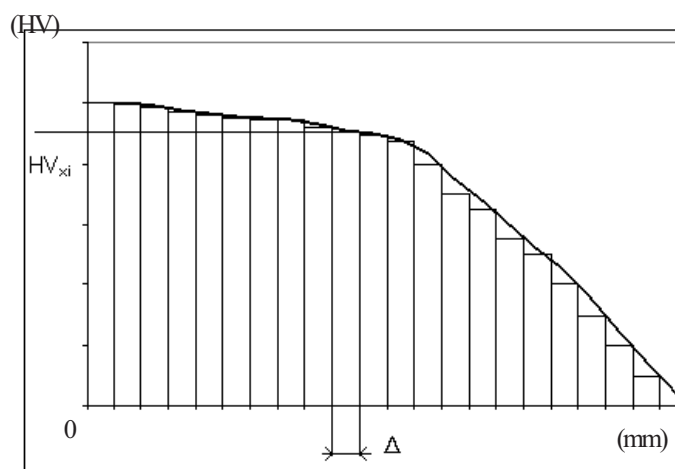
Sl. 6. Analiza največje globine mehanskega utrjevanja za različne rezalne hitrosti
 Fig. 6. Analysis the variations of maximum hardening values for different cutting speeds



Sl. 7. Analiza globine največjega mehanskega utrjevanja za različne rezalne hitrosti
 Fig. 7. Analysis of the depth of maximum work hardening for different cutting speed



Sl. 8. Podroben prikaz spremembe vrednosti največjega utrjevanja pri posameznih rezalnih hitrostih
 Fig. 8. Details the variations of maximum hardening values for different cutting speeds



Sl. 9. Načelo izračuna koeficienta celotnega utrjevanja
 Fig. 8. Principle of calculation of coefficient of total hardening

Rezultati na sliki 10 kažejo, da sta bili največji vrednosti mehanskega utrjevanja doseženi pri rezalnih hitrostih med 1400 do 1600 m/min ter pri 200 m/min. Poglavitni razlog za najvišje vrednosti mehanskega utrjevanja pri rezalni hitrosti med 1400 in 1600 m/min so velike vrednosti celotne globine mehanskega utrjevanja. Po drugi strani pa so, za rezalne hitrosti med 200 do 400 m/min, glavni razlog za močno utrjevanje prav velike vrednosti za HV_{xi} .

3 SKLEP

Učinek rezalne hitrosti na hrapavost površine in mikrotrdoto pod obdelano površino, nastalo pri obdelavi aluminijeve zlitine brez hlajenja, z izmenljivimi ploščicami iz karbidne trdine skupine K, je bil eksperimentalno določen. Zaostale napetosti še niso bile v celoti analizirane. Učinek toplotne obremenitve na mehčanje zgornjih plasti je raziskovan le za nekatere rezalne hitrosti; za simulacijo je uporabljena programska oprema AdvantEdge (metoda končnih elementov). Rezultati simulacije bodo objavljeni drugje.

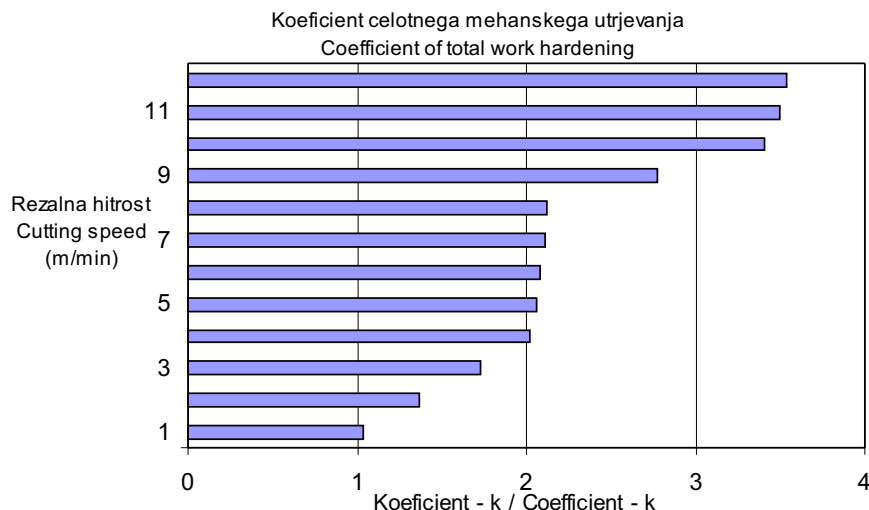
Na podlagi eksperimentalnih rezultatov lahko podamo naslednja sklepa:

The results presented in Fig.10 show that the highest values of work hardening were obtained for the 1400 to 1600 m/min and 200 to 400 m/min cutting speeds. The main reason for the highest values of work hardening at the 1400 to 1600 m/min cutting speeds are the total depth of the work-hardening values. On the other hand, for cutting speeds of 200 to 400 m/min the main reason for the highest values of the work hardening are the high values of work hardening (HV_{xi}).

3 CONCLUSION

The effect of cutting speed on the surface roughness and microhardness beneath the surface produced during dry aluminium-alloy machining using carbide type-K was investigated experimentally. The residual stresses have not yet been completely analysed. The effect of the thermal load on the softening of the upper layers investigated for some cutting speeds is being investigated by AdvantEdge finite-element method simulation software. The results will be published elsewhere.

The following conclusions can be drawn from the experimental results:



Sl. 10. Koeficient celotnega mehanskega utrjevanja
Fig. 9. Coefficient of total work hardening

1. Rezalna hitrost v raziskovanem območju vpliva na hrapavost površine. Pri rezalnih hitrostih 600 in 1200 m/min je dosežena hrapavost površine nekoliko manjša kakor pri preostalih rezalnih hitrostih. Rezultati bodo izrazito zmanjšanje časa obdelave, kar pa je zelo pomembno za ekonomičnost industrijskih postopkov.
2. Rezalna hitrost ima izrazit vpliv na spremembe mikrotrdote. Izbrane parametre kakovosti površine obdelovanca (trdnost, trdota – njihove vrednosti in potek) lahko izboljšamo z izbiro primerne rezalne hitrosti.

Rezultati projekta LN00B128 so bili finančno podprti od Ministrstva za šolstvo Češke Republike.

1. The cutting speed has an influence on the surface roughness. For 600 and 1200 m/min, the cutting speed used is lower than for the other cutting speeds used. However, the cutting speed has less influence on the surface roughness than the feed rate or the cutting-edge radius.
2. The cutting speed has a significant influence on the variations in microhardness. Selected parameters of workpiece surface quality can be improved by choosing a suitable cutting speed (strength, hardness, their values and their range)

The results of project LN00B128 were financially supported by the Ministry of Education of the Czech Republic.

4 LITERATURA 4 REFERENCES

- [1] Bailey, J. A., S. Yaza, T. Uchida, and Y. Mori (1980) Cutting performance of sintered CBN tools, *Cutting Tool Materials. Proceedings of the International Conference*. American Society for Metals, Ft. Mitchell, Kentucky, 281-295.
- [2] Matsumoto, Y., M.M. Barash, and C.R. Liu (1986) Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 Steel, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 108, No. 3, 169-175.
- [3] Abrão, A. M., M.L.H. Wise, and D.K. Aspinall (1995) Tool life and workpiece surface integrity evaluations when machining hardened AISI H13 and AISI E52100 steels with conventional ceramic and PCBN tool materials, *NAMRC XXIII Conference*, Houghton, Michigan, MR 95-195.
- [4] Tlustý, J., and Z. Masood (1978) Chipping and breakage of carbide tools, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 100, No. 4, 403-412.
- [5] Mills, A. F. (1992) Heat transfer, Irwin, Boston, 330-331.
- [6] Ashley, S. (1985) High-speed machining technology, 1985, *Chapman and Hall Ltd*.
- [7] King, R. I. (1985) Handbook of high speed machining technology, *Chapman and Hall Ltd*.
- [8] Smith, S., J. Tlustý (1997) Current trends in high-speed machining. *Transaction of the ASME*.
- [9] Dagiloke, I. F., A. Kaldos (1995) High speed machining: an approach to process analysis, *J. of Mater. Process. Technol.*
- [10] Shulz, H., T. Moriwaki, High – speed machining, *Annals of the CIRP*.

Naslova avtorjev: David Vaněček
prof.dr. Jan Mádl
Češka tehnična univerza v Pragi
Fakulteta za strojništvo
Technická 4
16607, Praga, Češka Republika
d.vanecek@seznam.cz

doc.dr. Mirko Soković
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000, Ljubljana
mirko.sokovic@fs.uni-lj.si

Author's Address: David Vaněček
Prof.Dr. Ing. Jan Mádl
Czech Technical Univ. in Prague
Faculty of Mechanical Eng.
Technická 4
16607, Prague, Czech republic
d.vanecek@seznam.cz

Doc.Dr. Mirko Soković
University of Ljubljana
Faculty of Mechanical Eng.
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana, Slovenia
mirko.sokovic@fs.uni-lj.si

Prejeto: 20.12.2002
Received:

Sprejeto: 29.5.2003
Accepted:

Odprt za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Tehnološke zahtevnosti pri izdelavi plinskega odvodnika

A Precision Techniques for Gas-Arrester Manufacturing

Andrej Pregelj - France Brecelj - Andrej Pirih - Vladimir Murko

Plinski odvodniki so hermetično zaprte celice, v katerih je med okrovom in elektrodo ujet argon ali njegova mešanica s primernim drugim zlahtnim plinom. Ob določenih pogojih (napetostni udar) plin lahko ionizira in s tem postane celica električno prevodna. Plinski odvodnik večjih moči, kakršnega razvijamo, je s še drugimi električnimi elementi povezan v sklop, ki deluje zaščitno, tako da omogoči takojšen odvod toka strele v zemljo. Čeprav je konstrukcija na videz preprosta, saj celoto sestavljajo le štiri glavni sestavni deli, je pa izdelava dokaj zahtevna. Za zagotavljanje čistosti in ohranjanje nespremenljivega tlaka plina v celici je treba uporabiti metode vakuumsko tesnega spajanja, ki so podobne onim pri proizvodnji elektronskih cevi.

V prispevku predstavljeni postopki so: izdelava spojev steklo - kovina, testiranje tesnosti in trdo spajkanje v zaščitni atmosferi. Na kratko je opisan razvoj tehnoloških postopkov do sedanjega stanja in nakazane so možnosti za zmogljivejšo opremo za industrijsko proizvodnjo.

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: odvodniki plinski, spoji steklo-kovina, preskušanje tesnosti, spajkanje trdo)

Gas arresters are hermetically sealed cells in which argon, or a mixture of argon and another noble gas, is captured between two isolated electrodes. Under defined conditions (e.g. lightning strike, etc.) it can become ionised, i.e. capable of conducting an electric current. The gas arrester designed for higher powers that has been developed in our laboratory is connected with other electro-elements in a special device that acts protectively in such a way that it diverts the lightning strike to the earth. The construction of the cell is relatively simple: no more than four main pieces are joined in a compact compound, but the procedures are not simple. To ensure high levels of cleanliness and required constant gas pressure in the cell for a period of years, it is necessary to use methods of vacuum-tight joining that are similar to those used for electron-tube production.

In this paper the presented techniques are the manufacturing of glass-to-metal joints, leak detection and hard brazing in an inert atmosphere. A short description of the technology developed so far and the capabilities for more productive equipment are also given.

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: gas arresters, glass-to-metal joints, tightness tests, brazings)

0 UVOD

Strele, preklopna rokovalja v stikalnih postajah v spletu porabnikov električne energije in drugi nenačrtovani pojavi povzročajo v električnem omrežju udarne sunke in valovanja. Posledica so prenapetosti, ki v priključenih električnih napravah (računalniki, telefoni, hi-fi instrumenti, itn.) lahko povzročijo poškodbe. Obramba pred njimi so zaščitne naprave, ki se jih vgrajuje v razdelilne omarice na vstopu električne mreže v stavbe. Njihov pomemben sestavni del so prenapetostni odvodniki, med katerimi zavzemajo posebno mesto plinski odvodniki.

0 INTRODUCTION

Switching manipulations in an electrical network caused by electric consumers, lightning and other unexpected phenomena cause waves and strikes in the network. The results are overvoltages, which can damage sensitive electrical equipment: like computers, telephone apparatus, hi-fi devices etc. The defense against such phenomena is protection elements that are built into electric installations at the points (distribution boxes) where buildings are connected to the network. The important components of these elements are overvoltage

Prednost plinskih pred drugimi vrstami odvodnikov je v tem, da so majhni po prostornini ter da v njih ostajata plazma in oblok zaprt v celici (ognjevarnost). Razvoj, katerega glavni namen je v prvi fazi nadomestiti uvoz tujih elementov, je zelo interdisciplinaren, saj povezuje znanosti o materialih, o plazmi ter elektrotehniko in že na svojem začetku kaže, da bo ključno za uspeh prav postavljanje tehnoloških postopkov izdelave.

1 KONSTRUKCIJA CELICE

Plinski odvodnik, kakršnega razvijamo (sl.1), je sestavljen iz lončastega telesa, ki mu odprtino na vrhu zapira strnjen sklop iz kovinskega obročka, stekla in osrednje elektrode, imenujemo ga prevodnica ali vtalek. V celici je še tableta barijevega klorida in izbrana plinska mešanica. S steklom ločena lonček in osrednji del prevodnice sta elektrodi, med katerima pride do preboja. Vsi spoji med različnimi materiali in sestavnimi deli morajo biti hermetično tesni.

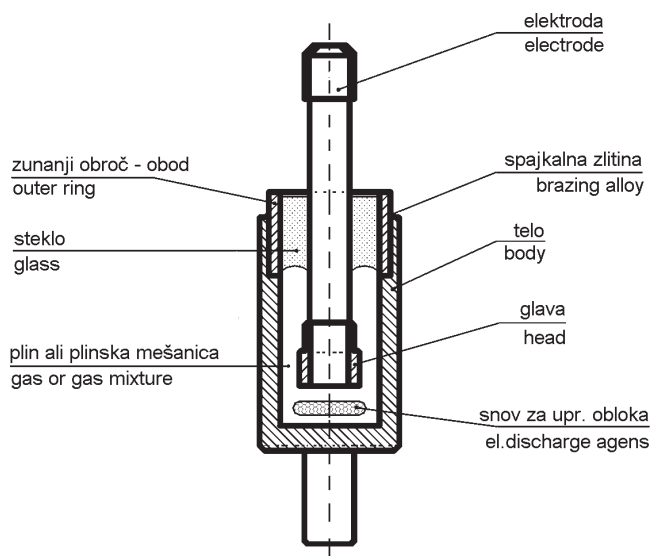
Lončasto telo in obod stekla sta iz jekla oziroma iz posebne zlitine, elektroda iz molibdena, steklo je posebno s termičnim raztezkom, ki je prilagojen raztezkom molibdena in obodnega kovinskega obroča. V izdelavnem postopku sta posebej pomembna dva koraka. Prvi korak je zahtevna izdelava prevodnice z dvema spojema steklo-kovina; postopek je naslednji: na grafitni podstavek zložene sestavne dele (obroček, steklena predoblika in elektroda) segrejemo v peči na okoli 1000 °C, steklo se stali in oprime pripravljenih kovinskih površin. Drugi (in zadnji) korak je zatalitev te prevodnice s trdo spajko (zlitina srebra in bakra) v ležišče telesa. Pri obeh omenjenih korakih je glavna zahteva tesnost izdelanega spoja; še posebej je skrb za tesnost pomembna ob temperaturnih spremembah v drugem koraku (spajkanje), da se ne poškoduje že prej izdelani

arresters, and among them a special place is reserved for so-called gas arresters because they are small and because the plasma is always captured in a cell, which means they cannot result in burning. The main goal of our activities is to reduce our dependence on the importation of these elements. Initial development efforts have focused on tackling the difficult precision techniques for gas-arrester finishing.

1 CELL DESIGN

The gas arrester we are developing now (Fig. 1) is composed of a metal pot that is closed at the top with a special feedthrough. The feedthrough is made of a ring, containing a central electrode that is sealed to both pieces with glass. The pot and the feedthrough are brazed together using a silver brazing alloy. In the cell interior there is a tablet of barium chloride, and a selected gas mixture is also trapped inside. All the joints between the different materials or pieces have to be sealed hermetically.

The central electrode and the pot represent two poles isolated by glass, and between them an electric arc appears under defined conditions. The pot and the ring are made of steel or a special alloy, and the electrode is made of molybdenum; the glass is special in terms of its thermal dilatation and has to accommodate the dilatations of the inner molybdenum electrode and the metal ring. There are two basic design steps in the manufacturing procedure. The first step is feedthrough finishing: the electrode, the glass perform and the outer ring are placed on the centering tool, and then by melting the glass at high temperature the central electrode and the outer ring are coupled together into a compact element. The second and final step is brazing the feedthrough into the pot. The main difficulty with both operations is



Sl. 1. Shema plinskega odvodnika
Fig. 1. Scheme of gas arrester

spoj steklo-kovina v prevodnici. Nujno je torej treba preverjati tesnost, za kar obstajajo posebne testne metode.

Celoten postopek je seveda daljši, saj ga sestavlja cela vrsta opravil. Poleg že omenjene izdelave spojev steklo-kovina in zaprtja plina so to še naslednje: delo z vakuumskim sistemom na peči, nastavljanje temperaturnega režima pri spajkanju, doziranje čistih plinov, razplinjanje kovinskih delov, nanos galvanskih plasti, preverjanje tesnosti, spojev, izdelava spajkalnih obročkov in tablet $BaCl_2$, čiščenje in shranjevanje sestavnih delov, električni preizkusi itn. V naslednjem odstavku predstavljamo tri izmed omenjenih, ki so ključnega pomena za kakovost končnega izdelka.

2 ZAHTEVNI POSTOPKI IZDELAVE

2.1 Spoj steklo-kovina

Spoj steklo-kovina izdelamo tako, da hkrati segrevamo dotikajoča se kosa kovine in stekla na temperaturo, pri kateri postane steklo toliko zmehčano, da zalije in omoči površino kovine (ali zlitine). Osnova tovrstnim spojem je kovinski oksid, ki se v času dotikanja žareče kovine in staljene steklene mase kemijsko spoji z oksidnimi sestavinami stekla. Med ohlajanjem je najbolj ugodno, da se oba partnerja enako krčita, sicer pride do pokanja stekla. Spoje steklo-kovina delimo glede na toplotne raztezke obeh partnerskih materialov, na usklajene in neusklajene. Pri usklajenih (sl.2a) spojih združimo tako steklo in tako kovino oziroma zlitino, ki imata v vsem temperaturnem območju ista ali vsaj čim bolj enaka toplotna raztežka. Največ uporabljani usklajeni spoj se izdeluje iz zlitine, poznane pod imenom kovar (Fe-Ni-Co) in iz "kovarskega" stekla (npr. Schott 8250) z raztežkom $\alpha = 50 \times 10^{-7}/K$. Med neusklajenimi spoji je najširše uporabljan stisni spoj (sl. 2b), pri katerem je steklo z manjšim raztežkom ujeta v obroč kovine z večjim raztežkom. V tem primeru adhezija med kovinskimi oksidi in steklom ni toliko pomembna, kajti odgovornost za trdnost in tesnost spoja prevzame

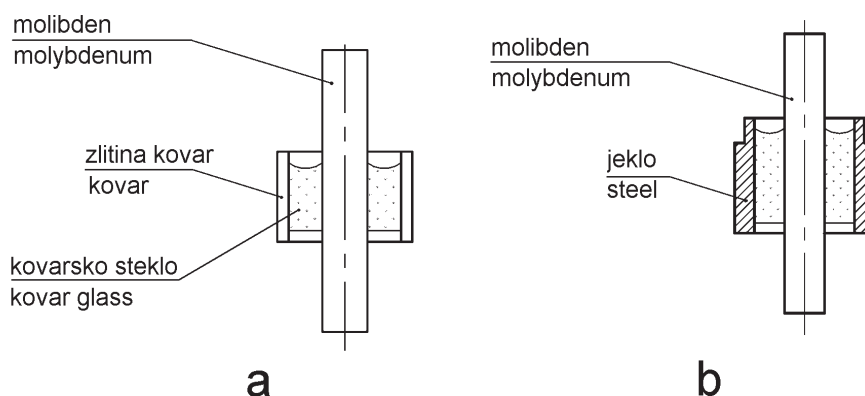
achieving a 100% hermeticity of the joint. During the second step it is important not to damage the very delicate glass-to-metal joint.

The whole procedure is longer than the mentioned two steps: it also involves many smaller steps. These steps include: braze-ring making, operating the vacuum system and the furnace, adjusting the profile of the brazing temperature, pure-gas metering, manufacturing glass-to-metal joints, encapsulation brazing, leak-detection of the seals and joints, keeping the components clean, electrical testing, etc. In the next section three especially important and interesting operations are presented.

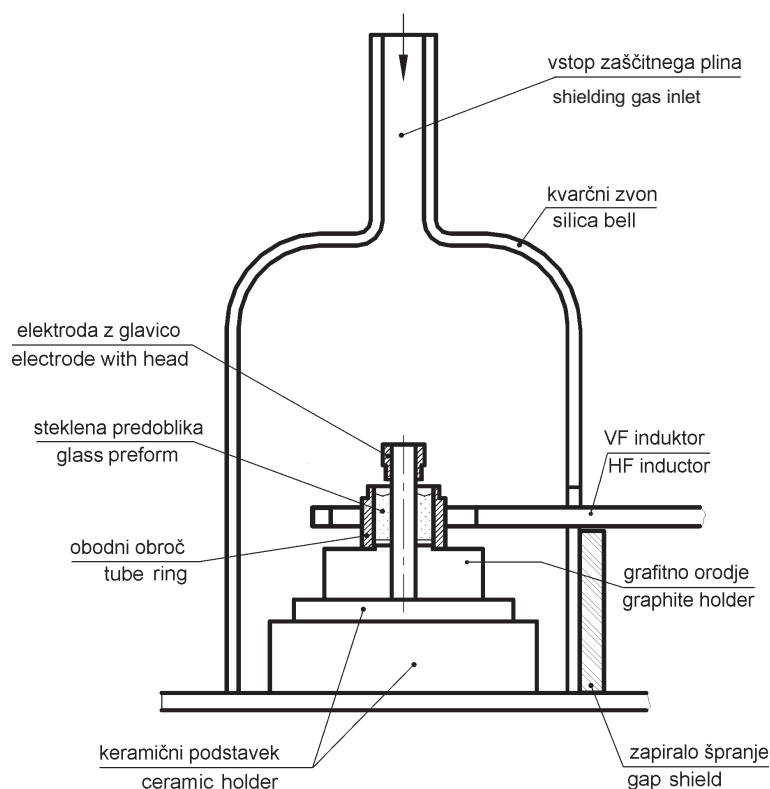
2 DEMANDING TECHNIQUES IN THE MANUFACTURING

2.1 Glass-to-metal joint

Glass-to-metal joints are made by simultaneously heating a piece of metal (or alloy) and a piece of glass that are in contact at the melting temperature of the glass. The principle of such a seal is the union of two sorts of oxides: the oxide of the metal piece firmly bonds the oxide components of the glass. This is realized during the time of full contact between the glowing metal and melted glass mass. During cooling it is very important that both parts contract in harmony, otherwise the in-built glass might break. Regarding the thermal extensions of the partner materials, there are two sorts of glass-to-metal joints, i.e. matched and unmatched. Matched ones (Fig. 2a) involve the joining of glass and metal (or alloy) with equal, or nearly the same, thermal expansions across the whole temperature range. The most commonly matched joints are manufactured from an alloy known as Kovar (Fe-Ni-Co) and of so-called "Kovar glass" (e.g. Schott 8250) with an expansion of $\alpha = 50 \times 10^{-7}/K$. The most frequent unmatched joint is the compressed joint (Figure 2b), where glass with a smaller expansion is caught in a metal ring that has a larger expansion. In this case the adhesion between the metal oxides and



Sl. 2. Dve vrsti spoja steklo-kovina (a - usklajeni in b - neusklajeni)
Fig. 2. Two sorts of glass-to-metal joints (a-matched, b-unmatched)



Sl. 3. Izdelava prevodnice z visokofrekvenčnim segrevanjem v inertni atmosferi
 Fig. 3. Feedthrough manufacturing using high-frequency heating in an inert atmosphere

krčna sila obodne kovine, ki se pojavi po ohladitvi pri izdelavi spoja. Stisni spoj se največ uporablja za električne prevodnice, pri katerih skozi stisnjeno steklo poteka osrednje prevodno kovinsko steblo. Obodna prirobnica je navadno iz nerjavnega jekla ali železa z razteznostnim koeficientom 100 do $160 \times 10^{-7}/K$, steklo pa izberemo tako, da ima koeficient okoli $90 \times 10^{-7}/K$. Na sliki 1 prikazani odvodnik je konstruiran z usklajenim spojem – zunanji obroč prevodnice je iz kovarske zlitine in uporabljeno steklo je kovarsko. V toku naših razvojnih dejavnosti izvajamo preizkuse tudi z izvedbo, ki ima stisni spoj.

Ene in druge spoje smo prvotno izdelovali z visokofrekvenčnim segrevanjem (sl. 3), sedaj pa prehajamo na staljevanje stekla (sl. 4) v peči. V obeh primerih zagotovimo potrebno odsotnost zraka (da ne pride do prevelike oksidacije) z uporabo inertne atmosfere. Zaščitni plin je navadno argon ali dušik, ki mu lahko dodamo 3 do 10 % vodika.

2.2 Preverjanje tesnosti

Eden glavnih pogojev za stabilno delovanje plinskega odvodnika je tesnost. Vsako puščanje ovojnice ima za posledico izgubo delovnega plina ali vdor zraka od zunaj, kar pomeni spremembo značilnosti elementa preko dopustnih meja. Prizadevanja za doseganje čim boljše tesnosti celice so torej razumljiva. Šteje se, da sestavni materiali ne prepuščajo plinov, nujno pa je treba preveriti tesnost oz. netesnost spojev.

the glass is not so important because the firmness and the tightness are achieved by the contracting force of the metal ring, which appears during cooling (in the last step of joint manufacturing). A compressed joint is normally used for electrical single- or multi-tip feedthroughs, where a glass insulator with a central conductive wire is placed in a metal wall. The outer metal is usually stainless steel with an expansion factor from $100 \times 10^{-7}/K$ up to $160 \times 10^{-7}/K$; a suitable glass would have a factor of approximately $80 \times 10^{-7}/K$. The arrester shown in Fig. 1 is made with Kovar and Kovar's glass, but we have also tried to develop a version with a compressed joint.

At the beginning of our development work both kinds of joints were produced using high-frequency heating (Fig. 3), in later experiments, however, we began to melt the glass (Fig. 4) in a furnace. In both cases the absence of air (to prevent oxidation) is achieved with an inert atmosphere.

2.2 Leak detection

Hermeticity is one of the first conditions for the stable operation of a gas arrester. The presence of a leak in the envelope causes a change of the gas composition (because air enters the chamber) and the arrester does not function appropriately. It is supposed that the component materials do not have leaks, but we need to test the quality of the joints.



Sl. 4. Deli pripravljene za izdelavo prevodnice s stalitvijo stekla
Fig. 4. Pieces prepared for feedthrough manufacturing

V primeru odvodnika izdelujemo spoje dvakrat; najprej ko izdelujemo vtalek (spoj s steklom) in na koncu, ko zapremo plin (trdo spajkanje kovin). Spoj steklo-kovina je pri vtalku za odvodnik dokaj zahteven, saj se pojavlja v stisnem spoju na dveh mestih (znotraj ob molibdenu in zunaj proti obodnemu obroču), poleg tega pa je to spojno mesto kasneje (ob spajkanju) ponovno izpostavljeno temperaturi. Med razvojem preverjamo najprej tesnost vtalkov in ob končnih preverjanjih tudi tesnost izdelanega odvodnika.

Netesnost neke stene je podana s količino plina, ki vdre skozi netesno mesto v določenem času in pri določeni tlačni razliki z ene strani na drugo; enota je torej mbarl/s. Za natančna preverjanja tesnosti se uporablja plin helij, ki ima poleg vodika najmanjše molekule in hkrati ni eksplozijsko nevaren.

Pri proizvodnji vtalkov testiramo tesnost s helijevim masnim spektrometrom, in sicer tako, da preizkušane vpiemo v primeren nastavek (orodje) in le-tega priključimo na testirno napravo, ki ima vgrajeno zaznavalo za helij. Nato izčrpamo prostor pod vtalkom in od zgoraj obpihavamo kritični spoj s tankim curkom helija (sl. 5). Če zaznavalo zazna dotok testnega plina, to pomeni, da je na mestu dotekajočega curka netesno mesto.

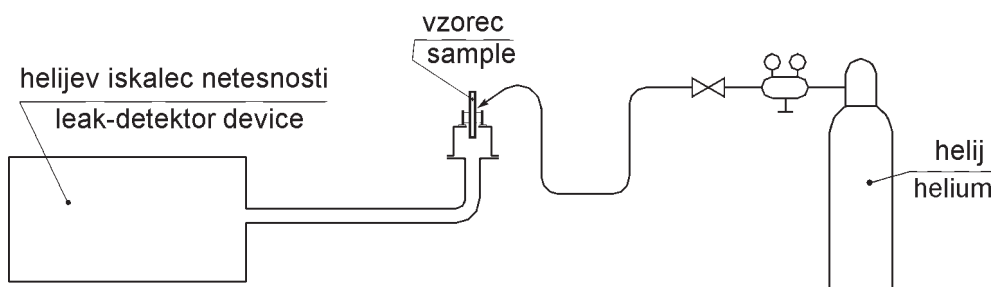
Pri testiranju končno izdelane celice je dostopna le ena stran spojev, druga pa ne. Zato izberemo metodo, imenovano "bombanje". V tem

In the case of gas-arrester manufacturing, two joints are present: at the glass-to-metal surfaces, at the brazed seal between the feedthrough and the body of the pot. A glass-to-metal joint is at two locations: inside, with molybdenum; and outside, with a metal ring. Therefore, there are three critical places where leaks can appear: twice at the glass-to-metal joint and once at the hard, brazed seal. The leak-detection on the three places is obligatory. It is also very necessary because of the delicate glass-metal area in the feedthrough, which is twice exposed to high temperatures, the second one during the brazing operation.

The leakage is expressed in terms of the quantity of gas (air) that flows through the leak during a particular time unit for a defined pressure difference from one side to another. The accepted unit for the size of a leak is mbarl/s. Usually, helium gas is used for such testing because it has the smallest molecules and is not explosive.

Gas-arrester feedthroughs are leak detected using a helium mass spectrometer, i.e. using a residual gas analyzer adjusted for the mass of helium. The sample has to be put in a suitable tool that is connected to the instrument. The space under the sample is then evacuated and on the upper side a narrow jet of helium gas is admitted to the critical places (Fig. 5). If the instrument senses a flow of test gas, it means that in the location of the jet there is a leak.

For finished cells only one side of the joints is accessible. Therefore, another method is chosen, known as bombing. In this case a sample cell must



Sl. 5. Načelo iskanja netesnosti s helijevim masnim spektrometrom
Fig. 5. Principle of leak detection using a helium mass spectrometer



Sl. 6. Prvi del "bombanja"
Fig. 6. First step of bombing procedure

primeru namreč v primerni bombici (sl. 6) izpostavimo preizkušane celice tlaku helija (npr. 5 bar, dve uri), potem preskušano celico vzamemo ven, da se na okolnem zraku razplinijo zunanje površine (zračenje 1 do 2 uri), na koncu pa jo namestimo v komoro testirne naprave, ki zaznava helij. Če naprava ugotovi helij, je to znak, da le-ta prihaja skozi steno iz celice ali z drugo besedo, da je v steni netesnost.

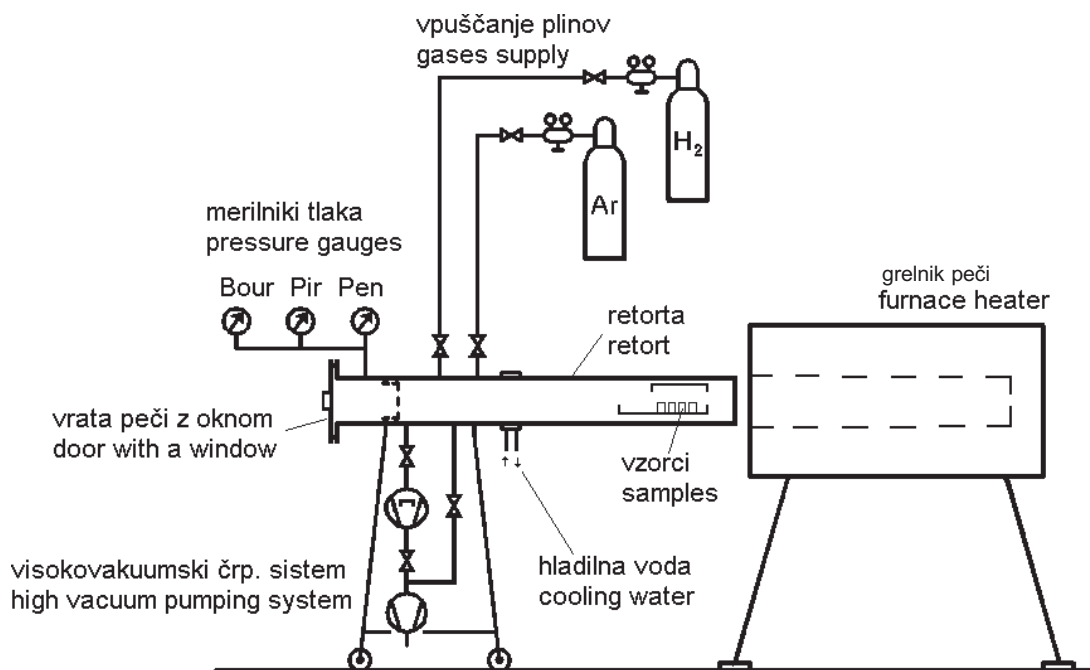
be exposed (in a suitable bomb, Fig. 6) to a pressure of helium (e.g. 5 bar, 2 hours). Then the sample has to be ventilated (e.g. 1 to 2 hours) and after this it is placed in an evacuated vessel - a part of the leak detector that senses the helium. If the presence of the test gas is established, it means that the gas is coming from the cell through a gap, and a leak is present in the envelope.

2.3 Zaprtje plina v celico

Končno zapiranje z zajetjem želenega plina v celico izvedemo v vakuumski peči, katero lahko preprihujemo oz. napolnimo z različnimi plini. Pri

2.3 Gas encapsulation

The final manufacturing operation is closing the cell, which has to ensure the hermeticity. This procedure is usually realized in a vacuum furnace



Sl. 7. Inkapsulacija plina v poskusne odvodnike s spajkanjem v vakuumski peči
Fig. 7. Gas encapsulation in samples by hard brazing in a vacuum furnace

našem razvoju smo uporabili retortno peč (sl. 7), ki je togo zvezana z visokovakuumskim sistemom na vozičku, tako da jo lahko kot celoto pomaknemo v grelno območje, ali pa jo potegnemo iz njega.

Elemente odvodnika (lonček, tableto klorida, vtalek in spajko) pravilno zložimo na podstavku na "ladjici", ki jo porinemo na določeno mesto v retorti; retorto nato zapremo in izpraznimo do tlaka $< 9 \times 10^{-5}$ mbar; med segrevanjem še vedno črpamo tako, da tlak pri tem ne naraste nad $2 \cdot 10^{-4}$ mbar. Ko dosežemo 500°C , prekinemo črpanje in vpustimo okoli 800 mbar argona (ali izbrane plinske mešanice). Nato nadaljujemo segrevanje do tališča spajke in ob njenem stečenju ostane plin ujet v celici. S tem je naš cilj dosežen.

Postopek je treba izpeljati tako, da se ne pokvari spoj steklo-kovina in da je spajkani spoj tesen. Pri tem je nemalo težav, ki jih odpravljamo z izkušnjami, pridobljenimi pri poskusih.

3 SKLEP

Energetski plinski odvodnik je pomemben element v prodajnem programu tovarne Iskra Zaščite. Da bi uvoz nadomestili z domačo celico, so bile sprožene razvojne dejavnosti, ki sta jih podprli tudi ministrstvi za znanost in za gospodarstvo.

V prispevku je na kratko opisano delovanje odvodnika ter konstrukcija iz izdelavno tehnologijo. Pri tem so podrobneje predstavljeni trije manj običajni in dokaj zahtevni koraki v tehnološkem postopku, in sicer: problematika spoja steklo-kovina pri izdelavi vtalka, preverjanje tesnosti spojev in zaprtje plina v celico. V sedanjem stanju razvoja vlagamo največ naporov v odpravljanje netesnosti, v postavitev merilnih metod za testiranje električnih sposobnosti celice, v projekt skrajševanja postopka zaprtja (peči s posebnim grafitnim grelnikom) ter v razvoj oblikovno novih (večpolnih) in zato zmožnejših odvodnikov.

4 LITERATURA

4 REFERENCES

- [1] Bernat, D. (2001) Prenapetostna zaščita z uporabo odvodnikov prenapetosti razreda B, Ljubljana, *Delo + varnost*, 46, 4.
- [2] Meppelink, J., C. Drilling, M. Droidner, E.G. Jordan, J. Trinkwald (2000) Lightning arresters with spark gaps. Requirements and future trends of development and application, *Proceedings of ICPL 2000*, Rhodes, Greece.
- [3] Reece, M.P. (1963) Properties of the vacuum arc (part 1 of »The vacuum arc«), *Proceedings IEEE*, vol. 110, No 4.
- [4] Benson, A., P.M. Chalmers (1958) Effects of argon content on the characteristics of neon-argon glow-discharge reference tubes, *The Institution of Electrical Engineers*, Monograph No321 R.
- [5] Hering, E. (2001) Trennfunkstrecken für den Blitzschutz-Potentialausgleich, *Elektropraktiker*, Berlin, 55, 5.
- [6] Altmaier, H., K.Scheibe (1997) Netzfolgestromunterbrechung von Funkenstrecken, *ETZ*, Heft 7.
- [7] Standard IEC 60151-17 (1969-01): Measurements of the electrical properties of electronic tubes and valves. Part 17: Methods of measurement of gas-filled tubes and valves.

connected with a gas-supply unit. In our case we used a retort furnace connected to a transportable high-vacuum pumping station (Fig. 7), so it can be moved into or out of the heating zone.

The cleaned components of the gas arrester are precisely put together on a suitable boat and are pushed into a defined location in the retort. After that the furnace is closed and evacuated until a pressure lower than 9×10^{-5} mbar is achieved. During the heating the retort is still pumped so that the pressure due to temperature degassing does not increase over 2×10^{-4} mbar during the whole time. At 500°C the evacuation is stopped and argon (or another suitable gas mixture) is admitted into the retort with a pressure of approximately 800 mbar; then the heating is continued of a faster rate. When the braze ring melts (780°C) the gas is captured inside the cell and the heating is stopped.

The procedure needs a lot of experiences and has to be undertaken very carefully, so that the glass-to-metal joint remains undamaged and the brazed connection is sealed hermetically.

3 CONCLUSION

The power or so-called "heavy duty" gas arrester is an important product of Iskra Protections. In an attempt to substitute for imports by developing new types or domestic cell, several activities were started. The development is also supported by the Slovenian economy and science ministries.

The working principles, design and manufacturing technology of gas arresters are briefly treated in this paper. More detailed information is presented about the three basic steps of the manufacturing process: making glass-to-metal joints for the feedthrough, leak-detection of the arrester cells for checking the tightness and gas encapsulation by hard brazing. At the moment great efforts are being invested in leakage elimination, in the establishment of the testing procedures for controlling the cell's electrical performance, in shortening the encapsulation process (special furnaces with graphite heaters) and in the development of new shapes of gas arresters with more poles.

Naslovi avtorjev: mag. Andrej Pregelj
France Brecej
Tehnološki center za
vakuumsko tehniko
Teslova 30
1000 Ljubljana

mag. Andrej Pirih
mag. Vladimir Murko
Iskra Zaščite
Stegne 35
1000 Ljubljana

Authors' Addresses: Mag. Andrej Pregelj
France Brecej
Tehnološki center za
vakuumsko tehniko
Teslova 30
1000 Ljubljana, Slovenia

Mag. Andrej Pirih
Mag. Vladimir Murko
Iskra Protections
Stegne 35
1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto: 8.7.2002
Received:

Sprejeto: 29.5.2003
Accepted:

Odprt za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Poročila Reports

Evropski virtualni tribološki inštitut - VTI European Virtual Tribological Institute - VTI

OUVOD

Tribologija je interdisciplinarna znanstvena veda, ki se ukvarja s trenjem, obrabo in mazanjem stičnih površin pri relativnem gibanju, kakršne se pojavljajo pri ležajih, zobnikih itn. Prav obraba in trenje se pojavljata pri vseh tehničnih sistemih in postopkih, zaradi česar je tribologija pomembna prav za vse industrijske panoge. V Evropi je razpoložljivega veliko strokovnega znanja, in to iz najrazličnejših znanstvenih in tehničnih področij, povezanih s tribologijo.

Četudi je na voljo veliko uporabniškega znanja in izkušenj, je le-to geografsko razpršeno in zaradi pomanjkanja informacij, kje poiskati pravega strokovnjaka za rešitev določenega problema, težko dostopno majhnim in srednje velikim podjetjem. Prav tako večina povezav med industrijo in raziskovalnimi inštituti poteka na lokalni ravni in iz različnih razlogov ne presega državnih mej. Nastala situacija močno ovira izmenjavo in prenos znanja med raziskovalnimi organizacijami in industrijo v Evropi.

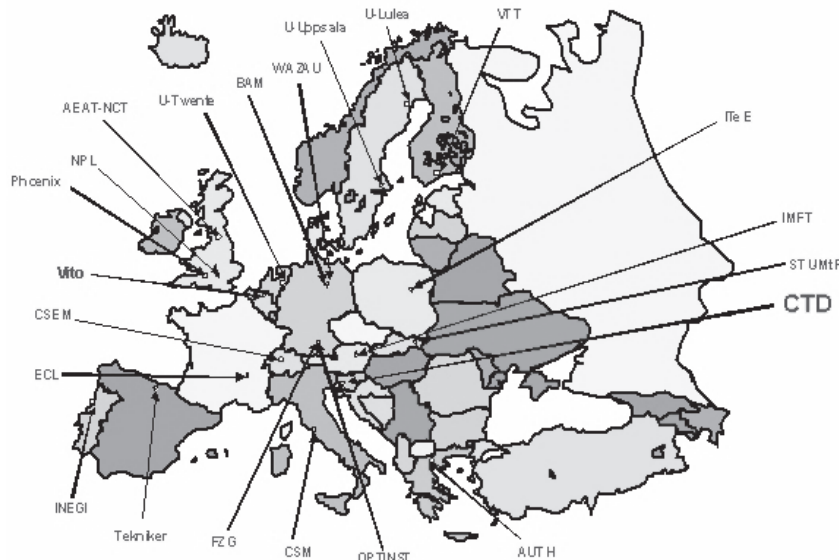
Virtualni tribološki inštitut ali VTI je bil ustanovljen prav z namenom premagati problem pretoka znanja. VTI je virtualni inštitut, kar pomeni, da je to mreža evropskih raziskovalnih inštitutov in univerz, katere člani posedujejo strokovno znanje in izkušnje iz najrazličnejših področij tribologije.

Industrijskim partnerjem tako VTI ponuja različne usluge in svetovanja, katerih glavni namen je izboljšanje pretoka znanja v evropskem prostoru.

VTI je bil v obliki projekta, ki ga pod okriljem petega okvirnega programa "Konkurenčnost in vzdržljiva rast" (Competitiveness and Sustainable Growth) financira Evropska skupnost, ustanovljen 22. januarja 2002. Koordinator VTI-projekta je VITO, Flamski tehnološko-raziskovalni inštitut, vodstveno skupino pa sestavljajo še BAM iz Nemčije, CTD iz Slovenije, NPL iz Anglije, Tekniker iz Španije in VTT iz Finske. Celoten konzorcij sestoji iz 22 uglednih raziskovalnih organizacij s področja tribologije, ki zastopajo 12 držav Evropske skupnosti in 4 pridružene članice. Slika 1 nazorno kaže geografsko razporeditev članic VTI v Evropi. VTI bo pričel delovati v letu 2003, ko bodo k članstvu povabljeni tudi nove raziskovalne organizacije. Od leta 2005 pa bo VTI neodvisna, ekonomsko usmerjena organizacija.

1 KAJ PONUJA VTI

Prek VTI-a imajo evropska podjetja preprost dostop do triboloških centrov odličnosti in s tem do njihovega znanja in raziskovalne opreme. Vključeni raziskovalni inštituti in organizacije pokrivajo zelo širok spekter področij, ki so povezana s tribologijo in jih znotraj ene same raziskovalne institucije nikakor ni moč združiti:



Sl. 1. Pregled ustanovne skupine VTI

- analiza in diagnosticiranje poškodb
- konstruiranje in načrtovanje
- mehansko in protiobrabno preskušanje
- tehnika površin
- maziva
- strojništvo
- modeliranje
- razvoj materialov (kovine, polimeri, keramika, itn.)
- predelava materialov (varjenje, odrezovanje, preoblikovanje, itn.)

Industrijska podjetja, ki se znajdejo pred tehničnim problemom ali kakršnim koli vprašanjem, povezanim s tribologijo, in ki želijo pomoč strokovnjaka, se lahko obrnejo na VTI prek elektronske pošte ali prek spletne strani. VTI omogoča svojim strankam tudi razpoznavo in analizo problema ter izbiro najprimernejšega raziskovalnega partnerja.

Članice VTI-a, ki imajo najprimernejše strokovno znanje za rešitev določenega problema, bodo na podlagi povpraševanja in ponudbe neposredno v stiku s tistim podjetjem. Prek konkurence znotraj VTI-a bo industrijskim podjetjem zagotovljena najboljša vrednost za vloženi denar. Pri vseh stikih z industrijo je zaupnost informacij zagotovljena. Vsi člani VTI-a imajo dolgoletne izkušnje pri sodelovanju z industrijo in se popolnoma zavedajo pomembnosti zaupnih informacij.

Poleg uslug industrijskim podjetjem bo VTI zagotavljal pomoč tudi svojim raziskovalnim članicam in industriji na splošno. En primer je pomoč pri pripravi raziskovalnih projektov z dolgoročnimi cilji, katerih priprava terja veliko časa in truda. Poleg iskanja partnerjev je potrebno tudi veliko administrativnega dela, ki samo po sebi še ne zagotavlja uspeha. Za pospešitev postopka priprave in zagona projekta ponuja VTI tako finančno pomoč kakor tudi pomoč v obliki baz podatkov, komunikacijskega sistema, povezavnih naslovov ipd. Pri tem je glavna vloga VTI-a povezati evropske industrijske partnerje in raziskovalne organizacije v mednarodno priznan konzorcij. Drug primer je finančna podpora organizacije delavnic z zanimivih področij tribologije, kakršna je bila delavnica na temo biološko razgradljivih maziv, organizirana januarja 2003 v Španiji.

Ker bo VTI sodeloval s podjetji iz različnih evropskih držav, je bila pozornost posvečena tudi vprašanju jezika. V ta namen je v vsaki državi, vključeni v VTI, določen raziskovalni inštitut, ki deluje kot krajevna povezovalna točka VTI-a in podjetjem omogoča komunikacijo in pomoč v državnem jeziku. V Sloveniji ima status krajevne povezovalne točke Center za tribologijo in tehnično diagnostiko.

2 PRIMER DELOVANJA VTI-A V PRAKSI – RAZVOJ MEHANSKIH DRSNIH TESNIL

Slovensko podjetje, ki se ukvarja z izdelavo in predelavo industrijske keramike, je pri Centru za tribologijo in tehnično diagnostiko (CTD), članu VTI-a, naročilo karakterizacijo svojih izdelkov z namenom poiskati ustrezno uporabo. Karakterizacija keramičnih prahov in dosedanjih izdelkov ter analiza slovenskega in svetovnega trga je izpostavila mehanska drsna tesnila kot izredno zanimiva a tudi tehnično zahteven izdelek.

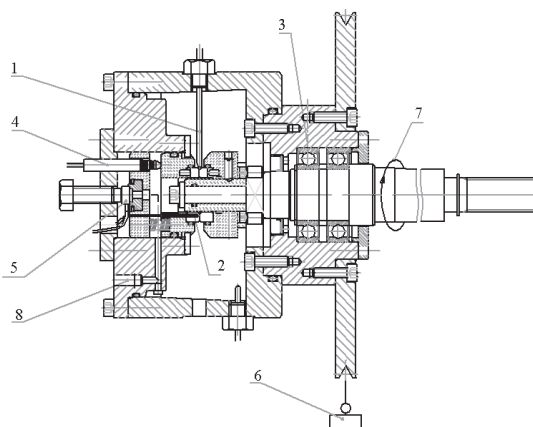
Prvi korak pri izdelavi prototipa mehanskega drsnega tesnila je bila določitev triboloških lastnosti izbranih materialov in materialnih kombinacij v različnih obratovalnih razmerah (tlak, drsna hitrost, temperatura, pogoji mazanja). Za določitev triboloških lastnosti in mej obratovanja izbranih materialnih kombinacij je bilo v CTD-u izdelano posebno preskuševališče, ki omogoča simulacijo stičnih razmer, kakršne vladajo pri mehanskih drsnih tesnilih (sl. 2). Samo preskuševališče omogoča pospešitev preskušanja in sprotno spremljanje 8 parametrov, to so temperatura (1,2,3), normalna sila in tlak (5), vrtilna frekvenca (7), moment trenja (6), premočrtna obraba (4) in puščanje (8).

V predstavljeni raziskavi so bili uporabljeni naslednji materiali:

- Al_2O_3 (92, 94, 96 in 99.7%)
- grafit
- jeklo

Analiza rezultatov modelnega preskušanja je obsegala:

- določitev pogojev mazanja,
- določitev koeficienta trenja in obrabe izbranih materialov,
- določitev mej obratovanja različnih materialnih kombinacij (sl. 2),
- izbiro materialnih kombinacij, primernih za mehanska drsna tesnila (96% Al_2O_3 /grafit in 99.7% Al_2O_3 /grafit).



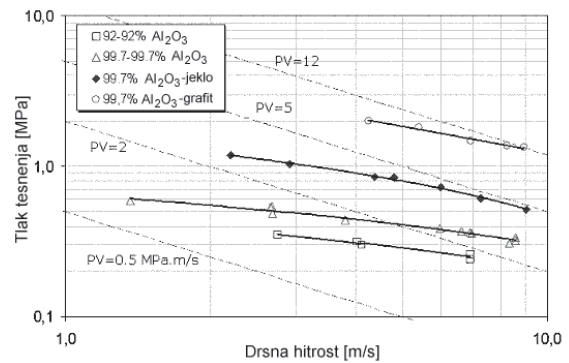
Sl. 2. Modelno preskuševališče

Na podlagi modelnega preskušanja so bili na sistemu centrifugalnih črpalk izvedeni še trajnostni testi po standardu API 682. Zaradi posebnosti sistema je bil postopek preskušanja rahlo spremenjen. Dinamični fazi 100 ur in 4 uram statične obremenitve je sledila preskusna faza ponovljivega obremenjevanja (5 min) in razbremenjevanja (10 min), ki je potekala do nastanka poškodbe drsnih obročev.

Rezultat predstavljene raziskave je bila izdelava prototipa mehanskega drsnega tesnila za črpalke za agresivna sredstva, ki je vključevala tako konstrukcijo tesnila kakor tudi določitev najprimernejše kombinacije materialov drsnih obročev.



Sl. 4. Mehanska drsna tesnila



Sl. 3. Meje obratovanja izbranih kombinacij

Direktor VTI:

Roland Korbe

VII

Boeretang 200, B-2400 Mol, Belgija

Tel.: +32 14335670

Fax: +32 14321186

e-mail: contact@vti-europe.org

Predstavnika VTI za Slovenijo:

Prof. Jože Vižintin

Dr. Bojan Podgornik

Center za tribologijo in tehnično diagnostiko

Bogišičeva 8, 1000 Ljubljana

Tel.: 01/4771460

Fax: 01/4771469

e-mail: vti-ctd@ctd.uni-lj.si

Strokovna literatura

Professional Literature

Ocene knjig

Applied Microtechnology

LIGA - Laser - micro Precision Engineering

Uredniki: Rainer Brück, Nadeem Rizvi, Andreas Schmidt, 17 soavtorjev

Zal.: Carl Hanser Verlag, München, 2001.

Obseg: format 16,5 × 24 cm, 269 strani, 166 slik, preglednice in CD-ROM.

Cena je 40,00 €

Knjiga je zasnovana kot učbenik, namenjen dodiplomskim študentom inženirskih in naravoslovnih smeri. Bralcu daje pregleden in zgoščen uvod v fizikalne in tehnološke osnove postopkov s področja tehnologij, ki omogočajo izdelavo mikromehanskih elementov.

To področje se v zadnjih letih tako intenzivno razvija, da ga mnogi štejejo za eno od gibal prihodnjega tehnološkega razvoja. Kljub precejšnjem številu v zadnjih letih objavljenih del s tega področja, pa je med njimi le malo takih, ki bi bila primerna kot didaktično gradivo za širšo populacijo študentov na dodiplomski stopnji. Pričujoča knjiga uspešno zapolnjuje to vrzel in je s tega vidika nadvse dobrodošla. Označuje jo jasna in nazorna predstavitev tehnoloških postopkov, pri čemer se besedni opis učinkovito prepleta z bogatim, v veliki meri barvnim, slikovnim gradivom. Knjigi je priložena tudi podatkovna zgoščenska z grafičnimi oživitvami in video izrezki posameznih postopkov, kar dodatno osvetljuje in popestri obravnavano tematiko.

Knjiga deli mikro-obdelovalne tehnologije na tri vrste: litografsko (znano po kratici LIGA) lasersko in mikronatančno, v katero prišteva postopke elektroerozije in mehanske obdelave.

Osrednja pozornost pri obravnavi posameznih tehnoloških vrst je namenjena predvsem praktičnim vidikom njihove uporabe. Fizikalne osnove posameznih postopkov so zato obdelane zgoščeno in le v tolikšni meri, da omogočajo razumevanje povezav med parametri postopkov. Poleg značilnosti postopkov so podrobneje obdelani zgradba, delovanje in krmiljenje sodobnih strojev oz. naprav. Znatna pozornost je posvečena materialom in predstavitvi značilnih mikromehanskih izdelkov. Preglednost dela poudarja primerjava teh tehnologij z vidika obdelovanih materialov, geometrijskih značilnosti, toleranc in površine hrapavosti obdelovancev, možnosti za posamično in masovno proizvodnjo, potrebnih investicij in obratovalnih

stroškov ter varnosti in okoljevarstvenih vplivov. Koristni pripomočki za študij te tematike so tudi vsebovani seznam pogosto uporabljenih okrajšav, slovar izrazov in pregled novejših literature, ki lahko rabi tudi kot napotilo za nadaljnji študij.

Knjiga je nastala kot rezultat sodelovanja 17 avtorjev iz sedmih organizacij iz štirih evropskih držav v okviru projekta TRANSTEC, ki ga je sofinancirala Evropska komisija.

J. Diaci

Konrad Etschberger, s soavtorji:

Controller-Area-Network

Grundlage, Protokolle, Bausteine, Anwendungen

Zal: Carl Hanser Verlag, München, 3. popr. izd. 2002.

Obseg: format 16,5 × 24,5 cm, 508 strani.
Cena je 49,90 €

Knjiga celovito obravnava vse vidike standardiziranega področnega vodila, znanega pod kratico CAN. Vodilo so v 80. letih zasnovali in opredelili v podjetju Robert Bosch GmbH za komunikacijo med elektronskimi podsestavi motornih vozil. V razmeroma kratkem času se je njegova uporaba razširila na nadzorne in krmilne sisteme na celotnem področju premičnih sistemov. V zadnjem času vse bolj pridobiva pomen tudi njegova uporaba na področju industrijske avtomatizacije.

Knjiga obravnava tematiko zelo sistematično. Začne s splošnimi pojmi in značilnostmi podatkovnih komunikacij in na tej osnovi opiše in primerja različne, danes uveljavljene sisteme področnih vodil. Sledi podrobna, a pregledna in razumljiva predstavitev podatkovne in fizične ravni vodila CAN, kakor ju definirajo različni mednarodni standardi. Za praktično rabo je zelo uporabna predstavitev značilnosti delovanja in primerjava danes tržno dostopnih krmilnikov CAN ter sprejemno oddajnih modulov.

Drugi del knjige obravnava standardizirane protokole in profile višje stopnje (CAL-CAN, CANopen, DeviceNet, SAE J1939, TTC), ki izhajajo iz vodila CAN in ga nadgrajujejo s širšim naborom storitev na nivoju uporabe, kar omogoča odprto komunikacijo - izmenjavo podatkov med elementi in podsestavi, ki jih izdelujejo različne tovarne. Poleg tega, da so na enem mestu zbrana in obdelana

področja, ki jih sicer določajo številni standardi, je posebna vrednost tega dela knjige v tem, da gre prek golega povzemanja ter opisovanja in obravnava tudi dejanske primere izvedbe vmesnikov. To še posebej velja za poglavje, ki obravnava vprašanja, povezana s snovanjem in izvedbo sistemov na osnovi vodila CAN. Zadnje poglavje je namenjeno predstavitvi tržno dostopnih komponent in orodij za razvoj omrežij

CAN. Knjiga je zanimiva v prvi vrsti za razvijalce sistemov in naprav, ki vključujejo rešitve na podlagi vodila CAN. Uporabna bo tudi za možne uporabnike takih naprav, ki želijo pridobiti pregled nad tem področje, pa tudi za študente, ki jim nemški jezik ni povsem tuj.

J. Diaci

Osebnosti vesti

Personal Events

Magisteriji, diplome

MAGISTERIJI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani sta z uspehom zagovarjala svoji magistrski deli, in sicer:

dne 12. februarja 2003: Damir Husejnagić, z naslovom: "Strojni vid za sledenje obdelovalnih sistemov" in

dne 26. februarja 2003: Boštjan Zajec, z naslovom: "Vpliv hladilno mazalne emulzije na lepljenje lamel iz elektropločevine po toplotni obdelavi".

S tem sta navedena kandidata dosegla akademsko stopnjo magistra tehničnih znanosti.

DIPLOMIRALI SO

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so pridobili naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

dne 3. februarja 2003: Primož BERGELJ, Miha LEVIČNIK, Gregor MAJDIČ, Klemen PEKLAJ, Peter POŽAR;

dne 28. februarja 2003: Primož KRAPEŽ, Matjaž MAKAROVIC, Jože ŠPENDAL.

*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so pridobili naziv diplomirani inženir strojništva:

dne 13. februarja 2003: Sebastjan FELTRIN, Alojz JERIČ, Rok NAROBÉ, Matjaž PETERNEL, Davorin POGRAJC;

dne 14. februarja 2003: Damjan BEVK, Boris ERJAVEC, Roman GRMEK, Boris KOŠMERL, Gregor SLAKAN, Klavdij ŽVANUT;

dne 17. februarja 2003: Saša CIGLAR, Peter ČEHOVIN, Matej ČUČEK, Ivan JUVANC, Robert LASIČ.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru je pridobil naziv diplomirani inženir strojništva:

dne 27. februarja 2003: Aleš MERVIK.

Navodila avtorjem

Instructions for Authors

Članki morajo vsebovati:

- naslov, povzetek, besedilo članka in podnaslove slik v slovenskem in angleškem jeziku,
- dvojezične preglednice in slike (diagrami, risbe ali fotografije),
- seznam literature in
- podatke o avtorjih.

Strojniški vestnik izhaja od leta 1992 v dveh jezikih, tj. v slovenščini in angleščini, zato je obvezen prevod v angleščino. Obe besedili morata biti strokovno in jezikovno med seboj usklajeni. Članki naj bodo kratki in naj obsegajo približno 8 tipkanih strani. Izjemoma so strokovni članki, na željo avtorja, lahko tudi samo v slovenščini, vsebovati pa morajo angleški povzetek.

Vsebina članka

Članek naj bo napisan v naslednji obliki:

- Naslov, ki primerno opisuje vsebino članka.
- Povzetek, ki naj bo skrajšana oblika članka in naj ne presega 250 besed. Povzetek mora vsebovati osnove, jedro in cilje raziskave, uporabljeno metodologijo dela, povzetek rezultatov in osnovne sklepe.
- Uvod, v katerem naj bo pregled novejšega stanja in zadostne informacije za razumevanje ter pregled rezultatov dela, predstavljenih v članku.
- Teorija.
- Eksperimentalni del, ki naj vsebuje podatke o postavitvi preskusa in metode, uporabljene pri pridobitvi rezultatov.
- Rezultati, ki naj bodo jasno prikazani, po potrebi v obliki slik in preglednic.
- Razprava, v kateri naj bodo prikazane povezave in posplošitve, uporabljene za pridobitev rezultatov. Prikazana naj bo tudi pomembnost rezultatov in primerjava s poprej objavljenimi deli. (Zaradi narave posameznih raziskav so lahko rezultati in razprava, za jasnost in preprostejše bralčevo razumevanje, združeni v eno poglavje.)
- Sklepi, v katerih naj bo prikazan en ali več sklepov, ki izhajajo iz rezultatov in razprave.
- Literatura, ki mora biti v besedilu oštevilčena zaporedno in označena z oglatimi oklepaji [1] ter na koncu članka zbrana v seznamu literature. Vse opombe naj bodo označene z uporabo dvignjene številke¹.

Oblika članka

Besedilo naj bo pisano na listih formata A4, z dvojnimi presledki med vrstami in s 3 cm širokim robom, da je dovolj prostora za popravke lektorjev. Najbolje je, da pripravite besedilo v urejevalniku Microsoft Word. Hkrati dostavite odtis članka na papirju, vključno z vsemi slikami in preglednicami ter identično kopijo v elektronski obliki.

Prosimo, da ne uporabljate urejevalnika LaTeX, saj program, s katerim pripravljamo Strojniški vestnik, ne uporablja njegovega formata. V urejevalniku LaTeX oblikujte grafe, preglednice in enačbe in jih stiskajte na kakovostnem laserskem tiskalniku, da jih bomo lahko presneli.

Enačbe naj bodo v besedilu postavljene v ločene vrstice in na desnem robu označene s tekočo številko v okroglih oklepajih

Enote in okrajšave

V besedilu, preglednicah in slikah uporabljajte le standardne označbe in okrajšave SI. Simbole fizikalnih veličin v besedilu pišite poševno (kurzivno), (npr. v , T , n itn.). Simbole enot, ki sestojijo iz črk, pa pokončno (npr. ms^{-1} , K, min, mm itn.).

Vse okrajšave naj bodo, ko se prvič pojavijo, napisane v celoti v slovenskem jeziku, npr. časovno spremenljiva geometrija (CSG).

Papers submitted for publication should comprise:

- Title, Abstract, Main Body of Text and Figure Captions in Slovene and English,
- Bilingual Tables and Figures (graphs, drawings or photographs),
- List of references and
- Information about the authors.

Since 1992, the Journal of Mechanical Engineering has been published bilingually, in Slovenian and English. The two texts must be compatible both in terms of technical content and language. Papers should be as short as possible and should on average comprise 8 typed pages. In exceptional cases, at the request of the authors, speciality papers may be written only in Slovene, but must include an English abstract.

The format of the paper

The paper should be written in the following format:

- A Title, which adequately describes the content of the paper.
- An Abstract, which should be viewed as a miniversion of the paper and should not exceed 250 words. The Abstract should state the principal objectives and the scope of the investigation, the methodology employed, summarize the results and state the principal conclusions.
- An Introduction, which should provide a review of recent literature and sufficient background information to allow the results of the paper to be understood and evaluated.
- A Theory
- An Experimental section, which should provide details of the experimental set-up and the methods used for obtaining the results.
- A Results section, which should clearly and concisely present the data using figures and tables where appropriate.
- A Discussion section, which should describe the relationships and generalisations shown by the results and discuss the significance of the results making comparisons with previously published work. (Because of the nature of some studies it may be appropriate to combine the Results and Discussion sections into a single section to improve the clarity and make it easier for the reader.)
- Conclusions, which should present one or more conclusions that have been drawn from the results and subsequent discussion.
- References, which must be numbered consecutively in the text using square brackets [1] and collected together in a reference list at the end of the paper. Any footnotes should be indicated by the use of a superscript¹.

The layout of the text

Texts should be written in A4 format, with double spacing and margins of 3 cm to provide editors with space to write in their corrections. Microsoft Word for Windows is the preferred format for submission. One hard copy, including all figures, tables and illustrations and an identical electronic version of the manuscript must be submitted simultaneously.

Please do not use a LaTeX text editor, since this is not compatible with the publishing procedure of the Journal of Mechanical Engineering. Graphs, tables and equations in LaTeX may be supplied in good quality hard-copy format, so that they can be copied for inclusion in the Journal.

Equations should be on a separate line in the main body of the text and marked on the right-hand side of the page with numbers in round brackets.

Units and abbreviations

Only standard SI symbols and abbreviations should be used in the text, tables and figures. Symbols for physical quantities in the text should be written in Italics (e.g. v , T , n , etc.). Symbols for units that consist of letters should be in plain text (e.g. ms^{-1} , K, min, mm, etc.).

All abbreviations should be spelt out in full on first appearance, e.g., variable time geometry (VTG).

Slike

Slike morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot sl. 1, sl. 2 itn. Posnete naj bodo v kateremkoli od razširjenih formatov, npr. BMP, JPG, GIF. Za pripravo diagramov in risb priporočamo CDR format (CorelDraw), saj so slike v njem vektorske in jih lahko pri končni obdelavi preprosto povečujemo ali pomajšujemo.

Pri označevanju osi v diagramih, kadar je le mogoče, uporabite označbe veličin (npr. t , v , m itn.), da ni potrebno dvojezično označevanje. V diagramih z več krivuljami, mora biti vsaka krivulja označena. Pomen oznake mora biti pojasnjen v podnaslovu slike.

Vse označbe na slikah morajo biti dvojezične.

Za vse slike po fotografskih posnetkih je treba priložiti izvorne fotografije ali kakovostno narejen posnetek. V izjemnih primerih so lahko slike tudi barvne.

Preglednice

Preglednice morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot preglednica 1, preglednica 2 itn. V preglednicah ne uporabljajte izpisanih imen veličin, ampak samo ustrezne simbole, da se izognemo dvojezični podvojitvi imen. K fizikalnim veličinam, npr. t (pisano poševno), pripišite enote (pisano pokončno) v novo vrsto brez oklepajev.

Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.

Seznam literature

Vsa literatura mora biti navedena v seznamu na koncu članka v prikazani obliki po vrsti za revije, zbornike in knjige:

- [1] Tamg, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

Podatki o avtorjih

Članku priložite tudi podatke o avtorjih: imena, nazive, popolne poštne naslove, številke telefona in faksa ter naslove elektronske pošte.

Sprejem člankov in avtorske pravice

Uredništvo Strojniškega vestnika si pridržuje pravico do odločanja o sprejemu članka za objavo, strokovno oceno recenzentov in morebitnem predlogu za krajšanje ali izpopolnitev ter terminološke in jezikovne korekture.

Avtor mora predložiti pisno izjavo, da je besedilo njegovo izvorno delo in ni bilo v dani obliki še nikjer objavljeno. Z objavo preidejo avtorske pravice na Strojniški vestnik. Pri morebitnih kasnejših objavah mora biti SV naveden kot vir.

Rokopisi člankov ostanejo v arhivu SV.

Vsa nadaljnja pojasnila daje:

Uredništvo
STROJNIŠKEGA VESTNIKA
p.p. 197/IV
1001 Ljubljana
Telefon: (01) 4771-757
Telefaks: (01) 2518-567
E-mail: strojniksi.vestnik@fs.uni-lj.si

Figures

Figures must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Fig. 1, Fig. 2, etc. Figures may be saved in any common format, e.g. BMP, GIF, JPG. However, the use of CDR format (CorelDraw) is recommended for graphs and line drawings, since vector images can be easily reduced or enlarged during final processing of the paper.

When labelling axes, physical quantities, e.g. t , v , m , etc. should be used whenever possible to minimise the need to label the axes in two languages. Multi-curve graphs should have individual curves marked with a symbol, the meaning of the symbol should be explained in the figure caption.

All figure captions must be bilingual.

Good quality black-and-white photographs or scanned images should be supplied for illustrations. In certain circumstances, colour figures may be considered.

Tables

Tables must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Table 1, Table 2, etc. The use of names for quantities in tables should be avoided if possible: corresponding symbols are preferred to minimise the need to use both Slovenian and English names. In addition to the physical quantity, e.g. t (in Italics), units (normal text), should be added in new line without brackets.

All table captions must be bilingual.

The list of references

References should be collected at the end of the paper in the following styles for journals, proceedings and books, respectively:

- [1] Tamg, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

Author information

The following information about the authors should be enclosed with the paper: names, complete postal addresses, telephone and fax numbers and E-mail addresses.

Acceptance of papers and copyright

The Editorial Committee of the Journal of Mechanical Engineering reserves the right to decide whether a paper is acceptable for publication, obtain professional reviews for submitted papers, and if necessary, require changes to the content, length or language.

Authors must also enclose a written statement that the paper is original unpublished work, and not under consideration for publication elsewhere. On publication, copyright for the paper shall pass to the Journal of Mechanical Engineering. The JME must be stated as a source in all later publications.

Papers will be kept in the archives of the JME.

You can obtain further information from:

Editorial Board of the
JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING
P.O.Box 197/IV
1001 Ljubljana, Slovenia
Telephone: +386 (0)1 4771-757
Fax: +386 (0)1 2518-567
E-mail: strojniksi.vestnik@fs.uni-lj.si