

Bernhard J. Stauder¹, Hubert Kerber², Peter Schumacher³,

¹ Nemak Linz GmbH; A-4030 Linz, Austria / Austrija

² Austrian Foundry Research Institute ÖGI / Avstrijski livarski raziskovalni inš.; A-8700 Leoben, Austria / Austrija

³ Montanuniversität Leoben, Chair of Casting Research, / Univerza v Leobnu, Oddelek za raziskave litja; A-8700 Leoben, Austria / Austrija

Ocena jeder iz peska v livarski industriji s 3-točkovnim upogibnim testom

Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation

Povzetek

Izboljšano razumevanje lastnosti jeder iz peska v livarski industriji je ključna zahteva za razvoj visoko natančnih postopkov ulivanja. Ta članek opisuje potencial ocene mehanskih in funkcionalnih lastnosti jeder iz peska z uporabo natančno pridobljenih krivulj podatkov iz 3-točkovnega upogibnega testa ob upoštevanju standardnih geometrij za upogibne preizkuse.

Preučili smo štiri sisteme organskih vezivnih sredstev. Poleg upogibne trdnosti in modula elastičnosti, ki izhajata neposredno iz krivulj obremenitve, je bila za odpravo učinkov usedanja vzorca krivulja obremenitve predobdelana za potrebe pravilne analize odklona in togosti. Porabljeno mehansko delo je razdeljeno na značilne elastične in plastične deleže dela do zloma, ki so ob upoštevanju zadevnih pogojev specifični za različna peščena jedra. Na podlagi krivulje in parametrov dela so bili razviti indikatorji brez dimenzij za namene kvantifikacije krhkosti jeder.

Na splošno je treba z vidika mehanske ocene peščenih jeder z umetnimi vezivi pretehtati viskoplastične učinke; pri sistemih vezivnih sredstev, ki niso popolnoma strjena, se zniža trdnost, zato so bili odklon in delo zloma opaženi pri nižjih hitrostih obremenitve.

Primerjalna analiza rezultatov je pokazala, da je koncept krivulje obremenitve primerno orodje za natančnejšo analizo lastnosti peščenih jeder.

Ključne besede: ulitek; preizkušanje peščenih jeder; ocena krivulje obremenitve; delo zloma; deformacija jedra; nadzor kakovosti.

Abstract

Improved understanding of foundry sand core properties is a key requirement for high precision casting process development. The present work demonstrates the potential to evaluate mechanical and functional sand core properties using precisely acquired 3-point bending test load curve data applying standard bending test geometries.

Four organic binder systems have been investigated. Further to bending strength and the elastic modulus, which can be directly derived from the load curves, a load curve pre-treatment to eliminate sample settlement effects was applied for a correct deflection and stiffness analysis. The consumed mechanical work shows characteristic elastic and plastic work portions until fracture, which are specific for different sand cores, respectively their condition. Dimensionless indicators to quantify core brittleness have been developed based on curve and on work parameters.

In general for mechanical evaluations of resin bonded sand cores, visco-plastic effects need to be considered, as for not fully hardened binder systems decreased strength, deflection and work of fracture were observed at lower load speeds.

The benchmark results show that the load curve evaluation concept is a suitable tool to analyse foundry sand core properties more sensitively.

Keywords: casting; sand core testing; load curve evaluation; work of fracture; core deformation; quality control

1 Uvod

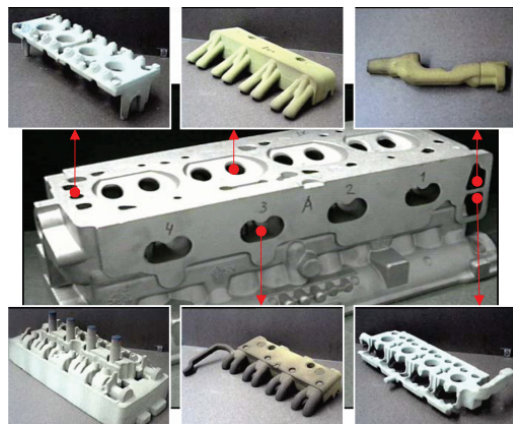
Izdelava kovinskih ulitkov z uporabo peščenih jeder omogoča produkcijo velikih serij kompleksnih komponent z internimi geometrijami. Primer takšnih komponent so glave valjev in bloki motorjev na notranje izgorevanje. Sliki 1 je prikazan ulitek glave valja iz aluminija ter potrebna peščena jedra za izdelavo notranjih površin, na Sliki 2 pa je prikazan sestavljen komplet peščenih jeder pred ulivanjem.

Vpliv tehnologije, materialov in procesnih parametrov na dimenzijsko

1 Introduction

Metal casting using sand cores allows to produce complex components with internal geometries in high volumes. Examples therefore are combustion engine cylinder heads and blocks. Figure 1 shows a cylinder head cast from Al and the required sand cores for the internal surfaces, while in Figure 2 a preassembled sand core package is shown prior to casting.

The influence of technology, materials and process parameters on dimensional accuracy of near-net-shaped castings has been systematically compiled by (Campbell, 2000). The foundry industry is forced to steadily improve process capabilities to



Slika 1: Prikaz ulitka zmerno kompleksne glave avtomobilskega valja iz aluminija ter potrebnih peščenih jeder za oblikovanje notranjosti (Sobczyk, 2008).

Figure 1: Illustration of a medium complexity car cylinder head in cast Al and the required sand cores to shape its cavities (Sobczyk, 2008).



Slika 2: Komplet peščenih jeder za kompleksno glavo valja, izdelan s procesom Rotacast (Gosch in Stika, 2005).

Figure 2: Sand core package for an intricately shaped cylinder head prepared for casting by the Rotacast process (Gosch and Stika, 2005).

natančnost kompleksnih strojnih delov je sistematično pregledal Cambell (Campbell, 2000). Livarska industrija je prisiljena v stalne izboljšave postopkov z namenom proizvodnje lahkih ulitkov s tankimi stenami, ki morajo prav tako ustrezati vedno strožjim zahtevam zakonodaje glede izpustov v okolje (Lellig in sod., 2010). V nadaljevanju je poudarjen pomen razvoja tehnologije peščenih jeder.

1.1 Tehnologija peščenih jeder v livarstvu in njen razvoj

Razvoj novih sistemov vezivnih sredstev, npr. kemično spajanje peščenih jeder, je temeljito raziskal Bindernagel (Bindernagel, 1983). Celovita zbirka o jedrih iz peska in sistemih vezivnih sredstev sta pripravila Flemming in Tilch (Flemming in Tilch, 1993). Mehanske lastnosti peščenih jeder so opisane predvsem s kvalitativnega vidika, podanih pa ni nobenih zakonov, povezanih z lastnostmi materialov.

V livarnah za avtomobilsko industrijo se za proizvodnjo jeder najpogosteje uporabljajo organski postopki Coldbox, Warmbox in Hotbox. Opise procesov so podali Langer, Dunnivant in Brown (Langer in Dunnivant, 2011) ter (Brown, 2010). Trenutno poteka postopek zamenjave organskih vezivnih sredstev z anorganskimi, pri katerih se tvori manj vonjav. Vendar pa je treba zaradi drugačnih lastnosti takšnih novih vezivnih sredstev dodatno pozornost nameniti kontroli procesov (Weissenbek in sod., 2011). Nedavno je Czerwinski s sodelavci (Czerwinski in sod., 2015) pripravil pregled najnovejše tehnologije jeder v livarski industriji v povezavi z več najpomembnejšimi organskimi in anorganskimi sistemi vezivnih sredstev, ki se uporabljajo v različnih livarskih panogah.

facilitate light-weight, respectively thin-walled castings, to contribute to ever tightening emission legislation requirements (Lellig et al., 2010). The importance of sand core technology development is highlighted there.

1.1 Foundry sand core technology and developments

The development of new binder systems, such as chemically bond sand cores was intensively characterized by (Bindernagel, 1983). A comprehensive collection about sand and binder systems was given by (Flemming and Tilch, 1993). Mechanical properties of sand cores are mainly qualitatively described and no property related material laws are proposed.

In automotive foundries the most widely applied core manufacturing processes are the organic Coldbox, Warmbox, and Hotbox core production processes. Process descriptions are given by (Langer and Dunnivant, 2011) and (Brown, 2010). Currently a substitution process of organic by inorganic binders having less odour development is ongoing. However, because of different properties, process relationships for such new binder types require increased attention on the process control (Weissenbek et al., 2011). Recently (Czerwinski et al., 2015) reviewed the state of the art of foundry core technology for several relevant organic and inorganic binder systems used in various foundry applications.

Summarized, fundamental requirements into sand core properties are:

- Sufficient strength to allow handling and manipulation operations;
- High resistance against humidity during core storage.
- High erosion and penetration resistance

Spodaj so povzete nujno potrebne glavne lastnosti peščenih jeder:

- zadostna trdnost, ki omogoča rokovanje in manipulacijo,
- visoka odpornost proti vlagi med skladiščenjem jedra,
- visoka odpornost proti eroziji in penetraciji ter odsotnost kemičnih reakcij z lito kovino zagotavlja dobro kakovost površine ulitka,
- nizka stopnja nastajanja plina in visoka stopnja prehajanja plinov, kar preprečuje napake,
- visoka upogibna trdnost: upogibanje je najpomembnejša vrsta obremenitve peščenih jeder med ulivanjem. Nastaja lahko zaradi sil stiskanja, termalne obremenitve, upora zaradi pretoka in obremenitev zaradi vzgona.
- enostavno otresanje po ulivanju, ki zagotavlja ulitke brez peska,
- primernost uporabljenega livarskega peska za regeneracijo,
- okolju prijazen sistem jeder, pri katerem ne nastaja veliko vonjav.

1.2 Raziskave peščenih jeder pod toplotnimi obremenitvami

Na splošno na voljo ni prav veliko literature o vedenju peščenih jeder med ulivanjem. V nadaljevanju je podanih nekaj primerov raziskav peščenih jeder za livarsko industrijo pod realističnimi obremenitvami skupaj z uporabljenimi tipi podatkov za modeliranje.

Deformacijo jedra za ulivanje kompleksne glave valja je preučil Dong s sodelavci (Dong in sod., 2010). Pri tem so uporabili podatke iz upogibnih testov in validacije z uporabo čašastega jedra za poskusno ulivanje. Predvideti je mogoče kritične regije ulitka kot posledico upogibanja jedra. Motoyama s sodelavci (Motoyama in sod., 2013) je raziskal zaostalo napetost

and no chemical interaction with the cast metal to deliver a good casting surface quality.

- Low gas evolution and high gas permeability to avoid casting defects.
- High bending strength: bending is the most critical load type for sand cores under casting conditions. It can be imposed by clamping forces, thermal load, flow drag and buoyancy loads.
- Easy shake-out after casting to obtain sand-free cast parts.
- A good recycling ability of used foundry sand.
- Environmentally friendly core systems with low odour development.

1.2 Research on sand cores under thermal load

Generally only little research on sand core behaviour under casting conditions can be found in literature. Some examples of foundry sand core investigations under realistic loading conditions and the applied types of modelling data are given here.

Deformation of a complex cylinder head water-jacket core has been studied by (Dong et al., 2010). Their used material data were based upon bending tests and upon validations using a cup type core for casting trials. Critical regions in the casting due to core bending could be predicted. (Motoyama et al., 2013) investigated residual stresses of castings influenced by counter forces from furanic moulds applying specifically developed in-situ measurement of the transmitted loads. The material properties for modelling were obtained by compressive tests.

(Stachowicz et al., 2011) have described cohesive and adhesive fracture mechanisms of inorganically bonded cores. Even sand grain cracking was observed,

ulitkov, na katere v nasprotni smeri delujejo sile furanskih kalupov, posebej razvitih za meritve prenesenih obremenitev *in situ*. Lastnosti materialov za modeliranje so pridobili iz tlačnih testov.

Stachowicz s sodelavci (Stachowicz in sod., 2011) je opisal kohezivne in adhezivne mehanizme lomov za jedra, izdelana z uporabo anorganskih vezivnih sredstev. Opazili so celo lomljenje peščenih zrn, vendar ne pri termalnih obremenitvah pod 1100 °C. Z upogibnimi testi pri visokih temperaturah je lastnosti novih škrobnih vezivnih sredstev za livarsko industrijo opisal Zhou (Zhou in sod., 2009). Poročali so o poškodbah peščenih jeder zaradi pokanja in razslojevanja vezivnega sredstva.

1.3 Preizkušanje peščenih jeder in drugih zrnatih materialov z vezivnimi sredstvi

Sledi diskusija o preizkusnih metodah za peščena jedra v livarski industriji in druge relevantne vrste materialov, za katere je značilna nizka stopnja plastične deformacije.

V livarski industriji so bili standardi preizkušanja peščenih jeder uvedeni sredi prejšnjega stoletja, kot potrjujejo tudi zapisi Društva livarjev Združenih držav Amerike (American Foundrymen's Society – AFS) - (Dietert, 1950). Upogibni testi so najpogostejše uporabljena metoda nadzora kakovosti zapeščenih jeder v livarski industriji, opisuje pa jih standard AFS (AFS, 1962) ter podobno tudi nemški standard (VDG, 1999). Noben ne predvideva pridobitve krivulje obremenitve, odklon snopa pa je mogoče določiti ročno. Hitrost obremenitve ni kvantificirana, vendar mora biti kljub temu konstantna ter delovati postopno. Upogibna trdnost se iz maksimalne obremenitve

but not below a thermal load of 1100 °C. High temperature bending tests to describe the properties of a novel starch binder for foundries were performed by (Zhou et al., 2009). They observed sand core damage through binder cracking and delamination.

1.3 Testing of sand cores and other bonded granular materials

Testing methods for foundry sand cores and other relevant material types with low plastic deformation will be discussed in the following.

Within the foundry industry the standards of sand core testing have been established in the middle of the last century, as documented by American Foundrymen's Society – AFS - (Dietert, 1950). Bending tests are the most widely applied quality control for foundry sand cores, described by AFS (AFS, 1962) and similarly by the German standard (VDG, 1999). In both, no load curve acquisition is required and the beam deflection can be manually driven. The loading velocity is not quantified, but should be constant and smoothly applied. The bending strength is calculated from the maximum load based upon linear elastic continuum mechanical relations.

To enable sand core deformation studies additional information from load-deflection curves is required. (Kerber et al., 2014) reviewed the conventional testing methods and standards for foundry sand cores. They demonstrated the improvement potentials by applying modern testing technology with precise load-displacement acquisition. A load velocity of 5 mm/min has been determined to achieve comparable conditions to existing bending test practice.

(Ratke and Brück, 2006) analysed load displacement curves from bending and compression tests to investigate the

izračuna na podlagi mehanskih razmerij linearnega elastičnega kontinuuma.

Za nadaljnje študije na področju deformacije peščenih jeder so potrebne dodatne informacije iz krivulj obremenitve in odklona. Kerber s sodelavci (Kerber in sod., 2014) je pripravil pregled preizkusnih metod in standardov za peščena jedra v livarski industriji. Dokazali so potencial izboljšav skozi uporabo moderne tehnologije preizkušanja s pridobitvijo natančne krivulje obremenitve in raztezka. Hitrost obremenitve 5 mm/min je bila določena za doseganje primerljivih pogojev z obstoječo prakso na področju upogibnih testov.

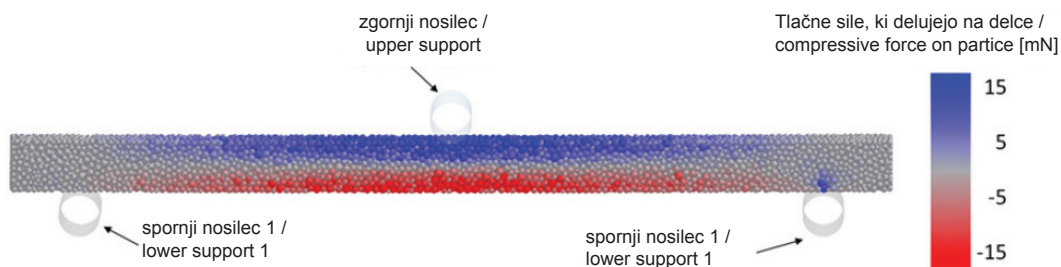
Ratke in Brück (Ratke in Brück, 2006) sta analizirala krivulje obremenitve in raztezka z upogibnimi ter tlačnimi testi z namenom raziskave vpliva zrnivosti in vsebnosti vezivnih sredstev na kompozite iz kremenčevega peska, spojene z aerogelom. Thole in Beckermann (Thole in Beckermann, 2009) sta na podlagi standardov za tritočkovne upogibne teste, značilne za preizkušanje kovin, raziskala deformacijo fenolno-uretanskih jeder, ki se strjujejo sama in jih ni treba žgati. Izmerila sta module elastičnosti blizu vrednosti 4 Gpa pri proizvedenih vzorcih ter približno 1 Gpa po izpostavljenosti termičnemu sevanju.

Schacht in Hayes (Schacht, 2004, pogl. Schacht in Hayes, Lastnosti materialov silika-opek) sta opisala krivuljo obremenitve za tlačne teste ognjevarnih silika-opek. Razmerje med maksimalnih smernim koeficientom tangente in sekante od ničle do točke maksimalne obremenitve je predstavljeno kot primerno merilo za opisovanje plastičnosti. Bradt (Schacht, 2004, pogl. Bradt, Fracture of Refractories) je opozoril na omejitve uporabe linearne mehanike kontinuuma za zrnaste materiale z vezivnimi sredstvi, ki imajo plastične lastnosti. Izboljšave je prikazal Wolf (Wolf in sod., 2013), in sicer na podlagi modela

influence of granulometry and binder content on silica-Aerogel bond composites. (Thole and Beckermann, 2009) researched the deformation of phenolic-urethane no-bake self-setting cores applying three-point bending test standards from metal testing. Elastic moduli close to 4 GPa in the as-produced samples and about 1 GPa after thermal exposure were determined.

(Schacht, 2004, chap. Schacht&Hayes, Silica brick material properties) described the load-displacement curve evaluation for compression tests on refractory silica bricks. The relation between the maximum slope tangent and the secant from zero to the maximum load point was presented as a suitable criteria to describe plasticity. (Schacht, 2004, chap. Bradt, Fracture of Refractories) pointed out the limitation of using linear continuum mechanics for bonded granular materials when having plasticity. Improvements were shown by (Wolff et al., 2013), applying "Discrete Element Method (DEM)" – simulations for a ceramic-polymer composite material under different bending test conditions. For small loads they have shown that visco-elastic effects could be neglected for the used acrylic binder. Moreover, initial settling against the load points are important and must be considered. They illustrated the performance of DEM simulations to investigate bonded particle compounds. A three-point bending DEM-setup is shown in Figure 3.

Tarokh and Fakhimi, 2014) compared measured and simulated bending test curves of siltstones. A satisfyingly good agreement was given identifying the initial deformation of the physical specimen. That early portion of the curve was influenced by closure of the space between the specimen and the loading platen and furthermore a postulated closure of micro-cracks in the specimen.



Slika 3: Natezne in tlačne sile, ki delujejo na delce med 3-točkovnim upogibnim testom (Wolff in sod., 2013).

Figure 3: Tensile and compressive forces on particles during 3-point bending (Wolff et al., 2013).

diskretnih elementov »Discrete Element Method (DEM)« – simulacije za keramično-polimerne kompozite pod različnimi pogoji upogibnih testov. Dokazali so, da je mogoče v primeru uporabljenih akrilnih vezivnih sredstev viskoelastične učinke zanemariti. Prav tako je treba upoštevati začetno usedanje na točke obremenitve. Dokazali so učinkovitost simulacij DEM za preučevanje spojin iz delcev. Na Sliki 3 je prikazan tritočkovni test DEM.

Tarokh in Fakhimi (Tarokh in Fakhimi, 2014) sta primerjala izmerjene in simulirane rezultate krivulj upogibnih testov za skril. Pri identifikaciji začetne deformacije fizičnega vzorca sta zabeležila izredno veliko stopnjo ujemanja. Na začetni del krivulje vpliva zapora prostora med vzorcem ter bremenom ter dodatno še predvidene zapore mikrorazpok v vzorcu.

Na podlagi krivulj obremenitve je mogoče analizirati tudi delo, dovedeno v vzorec. Rice (Rice, 1968) je za opisovanje plastičnosti vrha razpoke predstavil metodo »J-integral«. To načelo je v tem članku upoštevano. Namen je kvantificirati delo, ki ga dovede preizkusni stroj, ter oceniti elastično in plastično komponento dela.

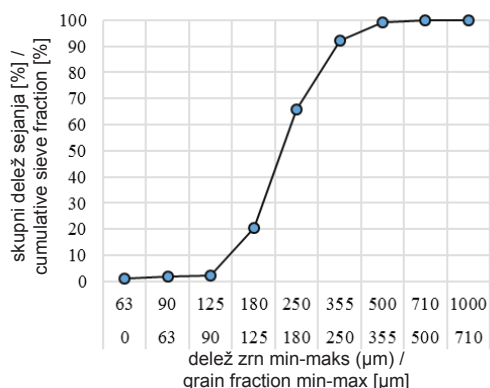
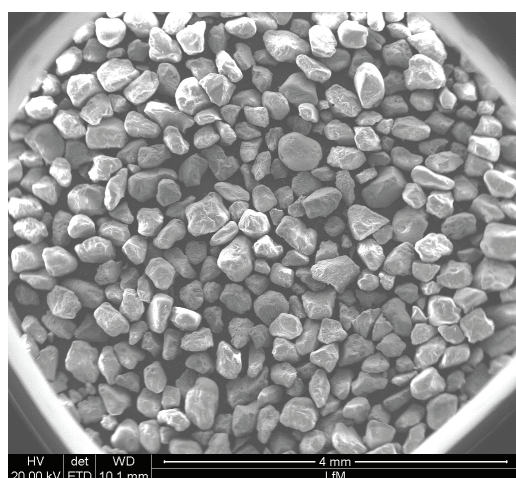
Further to load curves, the introduced work into the sample can be analysed also. (Rice, 1968) presented the "J-integral"-method to describe crack tip plasticity. An adoption of that principle will be used in this work. The goal is to quantify the introduced work from the testing machine and evaluate the elastic and plastic work portions.

2 Experimental methods

2.1 Used Materials

The sand used for all samples was silica sand "H32" according to the technical datasheet (Quarzwerke, 2009), being a widely used reference for binder testing purposes. Figure 4 shows its grain morphology and the grain size distribution.

Experiments are based upon one sand type and four different organic binder additions ranging from 1.2 – 1.9 wt.%. Table 1 defines the used binder systems and the hardening parameters, which are similar to typical serial applications used for Al-castings.



Slika 4: Morfologija peščenih zrn uporabljenega kremenčevega peska H32 in izhajajoče sejalne analize

Figure 4: Sand grain morphology of the used H32 silica sand and the according sieve analysis

2. Preizkusne metode

2.1 Uporabljeni materiali

Za izdelavo vzorcev je bil uporabljen pesek »H32« glede na podatke na podatkovnem listu (Quarzwerte, 2009), ki se kot referenca pogosto uporablja za namene preizkušanja vezivnih sredstev. Slika 4 prikazuje morfologijo peščenih zrn ter porazdelitev velikosti zrn.

Preizkusi so osnovani na eni vrsti peska in štirih različnih vezivnih sredstev v različnih količinah med 1,2 in 1,9 % teže jedra. V Preglednici 1 so opredeljeni uporabljeni sistemi vezivnih sredstev ter parametri strjevanja, ki so podobni tipičnim uporabam v serijski proizvodnji ulitkov iz aluminija.

2.2 Proizvodnja vzorcev

Mešanica peska in vezivnega sredstva je bila pripravljena v 5-kilogramskih serijah z laboratorijskim mešalnikom, nato pa je bila

2.2 Sample production

The sand-binder mixtures were prepared in 5 kg batches using a laboratory stir mixer and then immediately used for core production. A conventional 5 l core blowing machine (Roeper H5) and a core box for three test bars per shot according to (VDG, 1974) were used. The effectively obtained test bar dimensions were 22,7 x 22,7 x 180 mm³. The samples were stored and tested in standard room conditions with 30 – 50 % relative humidity.

Bending tests were conducted after storage times of 0, 1h, 4h and 24 h. The storage times were chosen as they are representative for high volume engine casting production. The "0 h"-condition describes the handling strength of the sand cores, which is important for their first manipulation after the core production. Testing was performed 5 min after core production. The results after 1h and 24 h represent the core properties at the

Preglednica 1: Uporabljena vezivna sredstva za poskuse ter glavne parametre strjevanja.

Table 1: Used binder systems for the experiments and main hardening parameters.

Sistem vezivnih sredstev / Binder System	Mešalna razmerja / Mixture ratios	Parametri strjevanja / Hardening parameters
Cold-box (CB)	Raztopina fenolne smole in izocianata v razmerju 1:1. Dimetiletilamin (DMEA) / Phenolic resin and isocyanate solution in 1:1 ratio. Di-Methyl-Ethyl-Amine (DMEA)	Naplinjenje s hlapi DMEA / DMEA vapour gassing 15 s
Hot-box (HB)	Fenol formaldehidna smola in vodna raztopina amonijevega nitrata v razmerju 5:1. / Phenol formaldehyde resin and aqueous ammonium nitrate solution in 5:1 ratio.	Segreto orodje / Heated tool: 220 °C / 30 s
Warm-box type 1 (WB1)	Furanska smola in vodna raztopina fenolne-sulfonske kisline, njenih aluminijevih soli in žveplene kisline v razmerju 5,5:1. / Furanic resin and aqueous phenol-sulfonic acid solution, its Al-salts and sulphuric acid in 5.5:1 ratio.	Segreto orodje / Heated tool: 220 °C / 30 s
Warm-box type 2 (WB2)	Modificirana sečnina in furanska smola ter vodna raztopina fenolne-sulfonske kisline in njenih aluminijevih soli v razmerju 4:1. / Modified urea-furanic resin and aqueous phenol-sulfonic acid solution and its Al-salts in 4:1 ratio.	Segreto orodje / Heated tool: 220 °C / 30 s

nemudoma uporabljena za izdelavo jeder. Uporabljen je bil običajen stroj za vpihovanje jeder s prostornino 5 l (Roepel H5) ter jedrniki za tri preizkusne plošče na vpih skladno z VDG (VDG, 1974). Dimenzije proizvedene preizkusne plošče so merile 22,7 x 22,7 x 180 mm³. Vzorci so bili skladiščeni in preizkušeni pri običajnih sobnih pogojih ter 30–50 % relativne vlažnosti.

Upogibni testi so bili izvedeni po 0, 1, 4 in 24 urah. Takšni časi skladiščenja so bili izbrani, ker so reprezentativni za serijsko proizvodnjo ulitkov motorjev. Pogoj »0 ur« opisuje trdnost med rokovanjem peščenih jeder, ki je ključna z vidika prve manipulacije z jedrom po njegovi izdelavi. Testiranje je bilo izvedeno 5 minut po proizvodnji jedra. Rezultati po 1 uri in po 24 urah predstavljajo lastnosti jeder ob začetku ter ob koncu običajnega zaključka uporabe jedra, kot je v praksi v livarstvu.

Povprečne vrednosti in standardni odkloni so določeni z vsaj tremi vzorci.

beginning and end of a typical core usage in foundry practice.

Mean values and standard deviations were determined for a minimum of three samples.

2.3 Three-Point-Bending-Tests

The bending tests were performed on a 5 kN universal testing machine (Zwick_Roell, 2015) with a precise load-displacement measurement. A load velocity of 5 mm/min and a data acquisition rate of 10 Hz were set for the benchmarking.

The lower support distance l is 150 mm and the cross section side length a is 22.7 mm. The bending stress calculation from the measured load F [N] according to continuum mechanics is shown by Equation 1.

$$\sigma = F - \frac{3l}{2a^3} \quad (1)$$

2.3 Tritočkovni upogibni testi

Upogibni testi so bili izvedeni na univerzalni napravi za preizkušanje 5 kN (Zwick in Roell, 2015), ki omogoča natančno merjenje obremenitve in raztezka. Za primerjalno analizo sta uporabila hitrost obremenitve 5 mm/min in frekvenco pridobivanja podatkov 10 Hz.

Razdalja med spodnjima nosilcema l meri 150 mm, prerez nosilca pa a 22,7 mm. Izračun upogibne napetosti iz izmerjene obremenitve F [N] skladno z mehaniko kontinuuma prikazuje Enačbo 1.

$$\sigma = F - \frac{3l}{2a^3} \quad (1)$$

Tritočkovni upogibni test vzorcev na nosilcih naprave skladno s standardi testiranja VDG je prikazan na Sliki 5.

3 Rezultati

Razdelek z rezultati je strukturiran tako, da prikazuje novo pridobljene podatke ter izhajajočo metodo za ocenjevanje, ki se uporabi za ocenitev krhkosti vzorca.

A three-point bending test sample put on the machine supports according to the VDG-testing standard is shown in Figure 5.

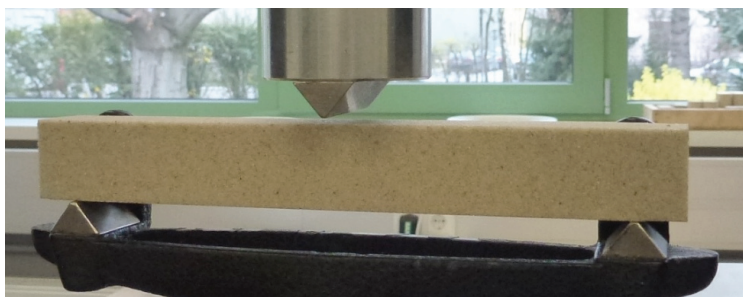
3 Results

The result section is structured to show the novel data acquisition and the subsequent evaluation method leading to evaluation of the sample brittleness. A final sequence will show the influence of load velocity on the properties.

3.1 Data acquisition and bending strength evaluation

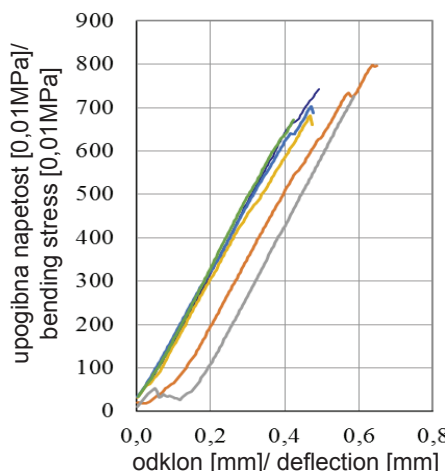
A typical example of acquired load curves is shown in Figure 6 (WB1 binder system after 4h storage time). The acquired bending strength results are visualized for all tested conditions in Figure 7.

The different curve onsets in Figure 6 are caused by settlement effects at the start of loading. However, the inclining curve shape is similar for all tested samples, and highly linear. Some irregularities due to the granular nature of the sand cores



Slika 5: Vzorec pečena jedra za livarsko industrijo med upogibnim testom. Premer zgornjega nosilnega dela treh nosilcev meri 3 mm skladno s standardi Društva livarjev Nemčije.

Figure 5: Foundry sand core sample at bending test. The three supports are line supports with a top radius of 3mm according to the German Foundrymen's Standards



Slika 6: Neobdelana obremenitev v visoki ločljivosti – krivulje odklonov. Jedro z vezivnim sredstvom WB1 preizkušeno po 4 urah skladiščenja

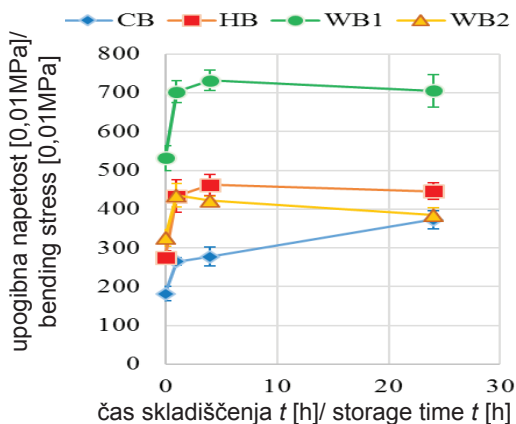
Figure 6: Untreated high resolution stress – deflection curves. Core binder WB1 tested after 4 h storage time

Končno zaporedje prikazuje vpliv hitrosti obremenitve na lastnosti.

3.1 Pridobivanje podatkov in ocena upogibne trdnosti

Tipičen primeru pridobljene krivulje obremenitve je prikazan na Sliki 6 (sistem vezivnih sredstev WB1 po 4 urah skladiščenja). Pridobljeni rezultati upogibne trdnosti za vse preizkušene pogoje so prikazani na Sliki 7.

Različni začetni deli krivulj s Slike 6 so posledica učinkov usedanja ob začetku obremenitve. Vendar pa je nagnjena in visoko linearna krivulja značilna za vse preizkušene vzorce. Opaziti je mogoče nekaj nepravilnosti, ki so posledica zrnivosti peščenih jeder. Do zloma vzorca pride spontano, ko je dosežena maksimalna trdnost.



Slika 7: Rezultati upogibne trdnosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 7: Bending strength results for all tested cores over storage time

can be observed. Sample fracture occurs spontaneously after reaching the maximum strength.

From Figure 7 it can be seen, that HB- and WB-cores reach their maximum bending strength at 1 to 4 h. After 24 h of storage, the bending strength of WB1- and HB-cores is decreased by about 3 %, and for WB2-cores more significant, by 12 %. The effect is generally associated to humidity take-up after the samples are cooled down, leading to softened bonds.

In contrast to that, CB cores show much lower bending strength but a continuous increase over time due to ongoing polymerisation. However, after 24 h the strength of CB cores is only similar to that of WB2. A summary of the bending strength results is presented by Table 2, including absolute and relative standard deviations.

The typical standard deviation is 6 % of the bending strength. Testing 10 samples for CB and HB-cores at the 24 h storage condition could confirm this typical scatter.

Preglednica 2: Povprečne vrednosti upogibne trdnosti in standardni odklon**Table 2:** Bending strength average values and standard deviation

t [h]	CB			HB			WB1			WB2		
	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]
0	182	18,9	10	275	16,5	6	532	32,6	6	326	22,3	7
1	265	9,7	4	434	41,6	10	703	27,7	4	435	30,6	7
4	278	24,2	9	462	27,6	6	732	25,4	3	421	12,0	3
24	372	22,6	6	446	21,7	5	705	42,1	6	385	17,9	5

S Slike 7 je razvidno, da jedra HB in WB dosežejo svojo najvišjo upogibno trdnost pri 1 do 4 urah. Po 24 urah skladiščenja se je upogibna trdnost WB1-jeder in HB-jeder zmanjšala za pribl. 3 %, upogibna trdnost WB-2 jeder pa se je zmanjšala bolj znatno, in sicer za 12 %. Učinek se v glavnem povezuje z povečanjem vlage po ohladitvi vzorcev, posledica česar so manj trdne vezi.

Nasprotno pa so CB-jedra izkazala mnogo nižjo upogibno trdnost, ki pa se je zaradi potekajoče polimerizacije večala v odvisnosti od časa. Kljub temu je bila trdnost CB-jeder po 24 urah podobna zgolj trdnosti WB2-jeder. Povzetek rezultatov upogibnih trdnosti je predstavljen v Preglednici 2, vključno z absolutnimi in relativnimi standardnimi odkloni.

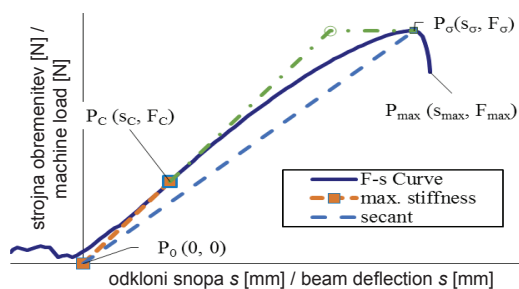
Tipičen standardni odklon znaša 6 % upogibne trdnosti. Preizkušanje 10 vzorcev CB-jeder in HB-jeder po 24-urnem skladiščenju bi lahko potrdil takšen tipičen raztros.

3.2 Krivulja obremenitve, togost in deformacije

Zaradi nadaljnje ocene je treba predobdelati krivulje obremenitve in izločiti začetne učinke usedanja. Značilne točke na krivulji so točka največje togosti (P_c), točka največje trdnosti (P_σ) ter končna točka krivulje obremenitve

3.2 Load curve stiffness and deformation

To permit further evaluations, a load curve pre-treatment to eliminate the observed initial settling effects is required. Characteristic curve points are the point of maximum stiffness (P_c), the point of maximum strength (P_σ) and the load curve end point (P_{max}). P_c meets the condition $(d^2s)/(ds^2)=0$. At P_σ the first derivative of the load curve is zero: $(d\sigma)/(ds)=0$. The load curve correction is conducted by shifting the curve with the intersection of the maximum stiffness tangent through P_c



Slika 8: Prikaz metode popravka oz. predobdelave krivulje obremenitve na podlagi tangente na točko največje togosti. Dodatno je označena sekanta na točko maksimalno trdnost

Figure 8: Illustration of the load curve settlement correction pre-treatment method based upon the maximum stiffness tangent. Additionally the secant to the maximum strength is indicated

($P_{\max}$). P_C ustreza pogojem $(d^2s)/(ds^2)=0$. Pri P_σ znaša prva izpeljanka iz krivulje obremenitve nič: $(d\sigma)/(ds)=0$. Korekcija krivulje obremenitve se izvede s premikom krivulje pri presečišču tangente na točko največje togosti skozi P_C ter vodoravno os skozi izhodišče (Slika 8).

Tipične predobdelane krivulje obremenitve in deformacije za vse sisteme vezivnih sredstev s po enim značilnim primerom za vsak čas skladiščenja (0/1/4/24 ur) so prikazane na Sliki 9 (a, b, c, d).

V glavnem se je pri CB-sistemih pokazala izrazita krivulja z nižjo togostjo v primerjavi z drugimi sistemi za vroče strjevanje. Krivulje CB-jeder dokazujejo tudi značilno odvisnost oblike krivulj obremenitve in odklona vse do 24 ur skladiščenja. Za vse sisteme vročega strjevanja so značilne predvsem linearne lastnosti obremenitve. Njihova togost je vse od 1 ure skladiščenja naprej primerljiva in nespremenjena kljub različnim upogibnim silam.

Kvantitativna parametra krivulje sta odklon pri maksimalni obremenitvi ter skladnost (primerjava na Sliki 8). V začetni fazi obremenitve se dodano delo elastično shrani v notranjosti vzorca. Predpostavlja se, da se, dokler ni dosežena vrednost P_C , energija preloma ne porabi. Na podlagi mehanskih razmerij linearnega elastičnega kontinuuma je mogoče oceniti modul elastičnosti ob upoštevanju maksimalne togosti $C_{\max} = F_C/s_C$ skladno z Enačbo 2:

$$E = \frac{\sigma_b}{\varepsilon} = \frac{l^3}{4a^4} C_{\max} \quad (2)$$

Slika 10 prikazuje rezultate odklona snopa pri maksimalnih stopnjah obremenitve (s_σ) in Slika 11 rezultate modula elastičnosti.

Odklon snopa iz predobdelanih krivulj obremenitve je lahko prvi indikator preoblikovalnosti jeder. V primeru sistemov z vročim strjevanjem so rezultati odklona

and the horizontal axis through the origin (Fig. 8).

Typical pre-treated load-deformation curves for all binder systems with one representative example for each storage time (0/1/4/24 hours) are shown in Figure 9 (a, b, c, d).

Generally, the CB-system shows a pronounced curvature and a lower stiffness compared to all other hot hardening systems. The curves for CB also show a distinct time dependency of the load-deflection curve shape up to 24 h storage time. All hot setting systems show a rather linear loading characteristic. Their stiffness is comparable and unchanged from 1 h storage time onward, despite their different bending strength levels.

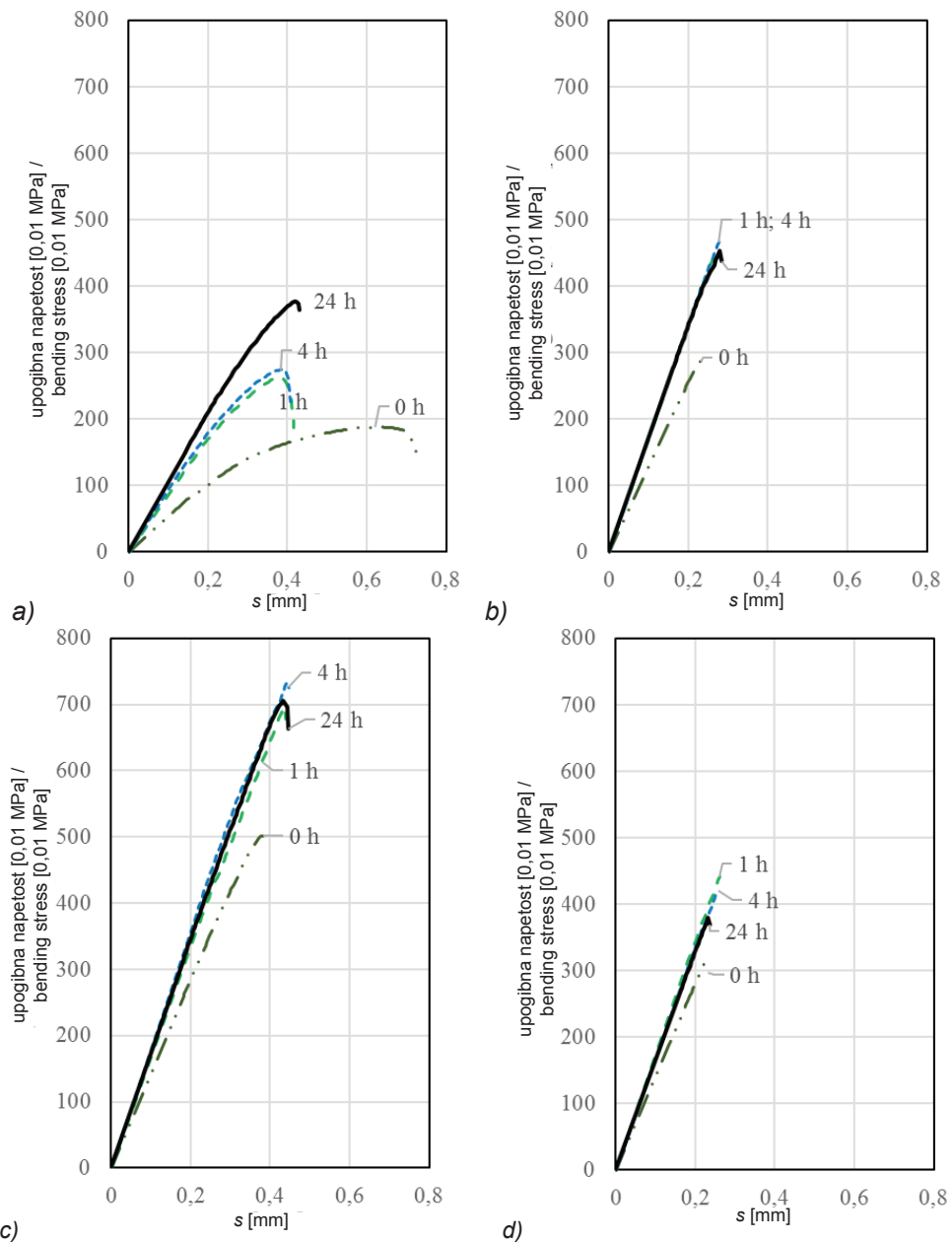
Quantitative curve parameters are deflection at maximum load and the compliance (compare Figure 8). In the initial load phase the introduced work is elastically stored in the sample volume. It is postulated that until P_C is reached no fracture energy is consumed. Based upon linear elastic continuum mechanical relations the elastic modulus can be evaluated using the maximum stiffness $C_{\max} = F_C/s_C$ according to Equation 2:

$$E = \frac{\sigma_b}{\varepsilon} = \frac{l^3}{4a^4} C_{\max} \quad (2)$$

Figure 10 shows beam deflection results at the maximum load level (s_σ) and Figure 11 the elastic modulus results.

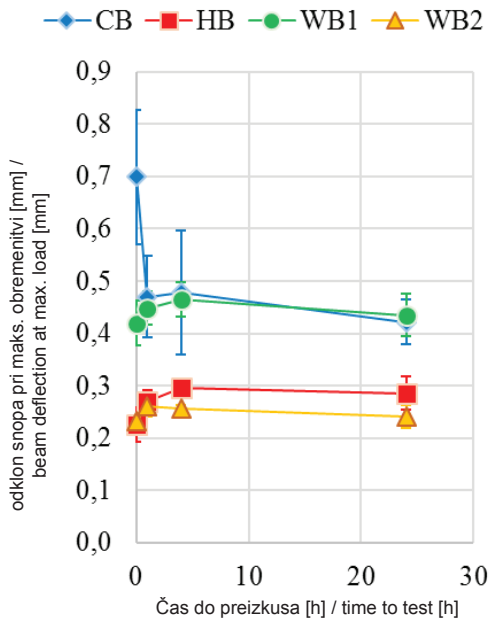
Beam deflection from pre-treated load-curves can be used as a first indicator for core deformability. For hot hardening systems the deflection results are significantly below that of CB-cores, except for WB1-cores, developing the highest strength.

Interestingly, the elastic moduli of the different HB- and WB-systems are very similar to each other. After 1 hour storage time E is about 2.7 GPa. The CB-cores exhibit about 30 – 50 % lower elastic moduli.



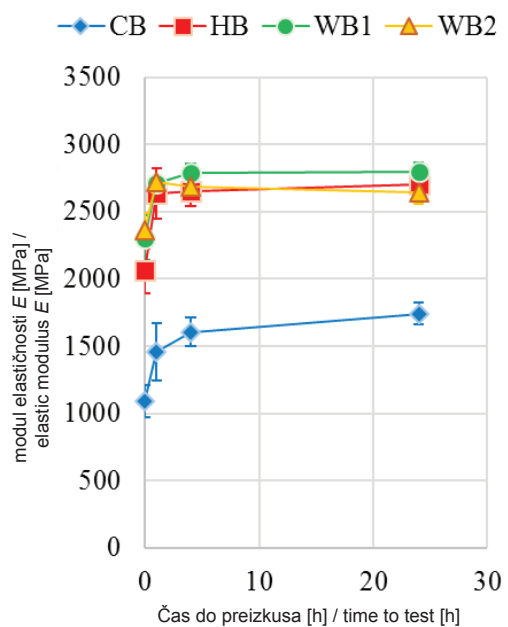
Slika 9: Krivulje upogibne napetosti kot funkcije odklona snopa po 0 h, 1 h, 4 h in 24 h skladiščenja. Sistemi vezivnih sredstev: a) Coldbox CB, b) Hotbox - HB; c) Warmbox-1 – WB1, d) Warmbox-2 – WB2

Figure 9: Bending stress curves as function of beam deflection after 0 h, 1 h, 4 h and 24 h storage time. The binder systems are: a) Cold-box - CB; b) Hotbox - HB; c) Warmbox-1 – WB1; d) Warmbox-2 – WB2



Slika 10: Skupni rezultati odklona snopa za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 10: Total beam deflection results for all tested cores over storage time



Slika 11: Rezultati modula elastičnosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 11: Elastic modulus results for all tested cores over storage time

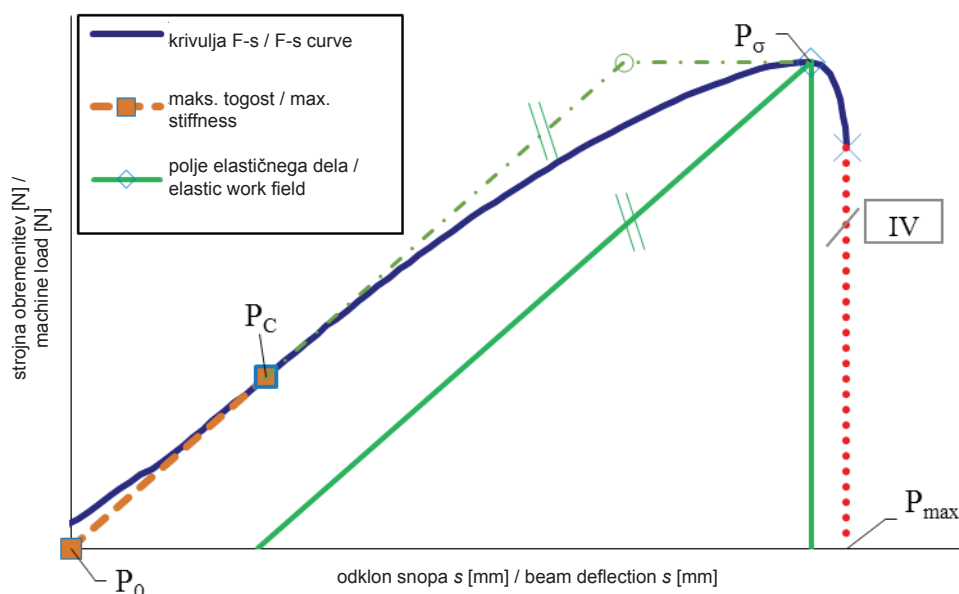
bistveno nižji kot v primeru CB-jedr, razen pri WB1-jedrih, za katere je značilna najvišja trdnost.

Zanimivo je, da so moduli elastičnosti precej različnih HB-sistemov in WB-sistemov med seboj izredno podobni. Po 1 uri skladiščenja znaša vrednost E pribl. 2,7 GPa. Pri CB-jedrih je bil izmerjen pribl. 30–50 % nižji modul elastičnosti. Po 24 urah je razen CB-vzorcev znašala 1,7 GPa. Vrednosti vseh sistemov so bile pri 0 h 20 % nižje v primerjavi z rezultati po 1h. To skupaj z večjo začetno preoblikovalnostjo dokazuje pomembnost ustreznega rokovanja in pogojev skladiščenja za novo proizvedena peščena jedra.

After 24 hours the CB-samples obtained a level of 1.7 GPa. All systems exhibited 20 % lower values at the 0 h condition compared to the 1 h results. This, combined with initially higher deformability underlines the importance of proper handling and storage conditions for newly produced sand cores.

3.3 Mechanical Work Evaluations

The totally introduced work W_M into the testing setup is displayed by the area below the untreated load-displacement curve. In Figure 12 an exemplary pre-treated load curve is shown. The characteristic points and the distinguishable elastic and plastic work areas I, II, III and IV are illustrated.



Slika 12: Grafična opredelitev regij I–IV, ki se uporabljajo za oceno mehanskega dela na podlagi primera krivulje obremenitve in odklona iz upogibnega testa

Figure 12: Graphical definition of the regions I–IV used for the mechanical work evaluation upon an exemplary bending test stress-deflection curve

3.3 Ocena mehanskega dela

Skupno dovedeno delo W_M v postopku preizkušanja prikazuje površina pod neobdelano krivuljo obremenitve in odklona. Na Sliki 12 je prikazan primer predobdelane krivulje obremenitve. Prikazani so značilne točke ter polja elastičnega in plastičnega dela I, II, III in IV.

Površina dela I (W_{pl}^i : začetno plastično delo) opredeljuje površino nad tangento na točko maksimalne togosti (P_0 do P_C) ter krivuljo obremenitve. Ta površina označuje učinke usedanja vzorca proti nosilcem. Ta delež dela ne vpliva na zlom vzorca.

Površina dela II (W_{pl}^σ : plastično delo do maks. obremenitve) opredeljuje površino med korigirano krivuljo obremenitve ter linearni nagib do P_σ pri krivulji maksimalne togosti. Predstavlja delež plastičnega dela do maksimalne obremenitve.

Work area I (W_{pl}^i : initial plastic work) defines the area above the maximum stiffness tangent (P_0 to P_C) and the load curve. This area is dedicated to settlement effects of the sample towards the supports. This work portion is not contributing to the sample fracture.

Work area II (W_{pl}^σ : plastic work until max. stress) defines the area between the corrected load curve and the linear incline to P_σ with the maximum stiffness slope. It represents the plastic work portion until the maximum load.

Work area III (W_{el}^σ : elastic work until max. stress) defines the area below the maximum stiffness incline to P_σ and thus describes the elastic work stored in the sample volume at the maximum stress. It depends on the geometric relations and the mechanical properties. At fracture W_{el}^σ

Površina dela III (W_{el}^{σ} : elastično delo do maks. obremenitve) opredeljuje površino pod nagibom maksimalne togosti do P_{σ} in tako opisuje elastično delo, ki se shrani v notranjosti vzorca pri maksimalni napetosti. Odvisna je od geometrijskih razmerij ter od mehanskih lastnosti. Pri zlomu se sprostí W_{el}^{σ} . Pretvori se v površinsko energijo preloma ter v neizmerjeno energijo elastične povračljivosti ob trenutku zloma vzorca.

Površina dela IV (W_{pl}^f : plastično delo do končnega zloma) opredeljuje površino pod krivuljo obremenitve od P_{σ} do zloma vzorca. Ta delež dela, kadar je sploh izmerljiv, odraža delo v povezavi s širjenjem razpoke. Običajno je mogoče pri tritočkovnih upogibnih testih razmeroma krhkih peščenih jeder opaziti širjenje nadkritičnih razpok, posledica česar so izredno nizke vrednosti W_{pl}^f .

V Preglednici 3 so podani pogoji v povezavi z regijami dela I–IV, ki so bile

is released. It is transformed to fracture surface energy and into non-measured kinetic spring back energy at the moment of sample fracture.

Work area IV (W_{pl}^f : plastic work until final breakage) defines the area below the load curve from P_{σ} until sample breakage. This work portion, if measurable at all, reflects the crack propagation work. Typically for three point bending tests of rather brittle sand cores an overcritical crack propagation can be observed, resulting in very low values of W_{pl}^f .

Table 3 gives the terms for the work-regions I–IV applied to evaluate the acquired load-displacement curves. The whole irreversible energy input is defined by the regions II and IV: $W_{pl} = W_{pl}^{\sigma} + W_{pl}^f$. The irreversible, or plastic, work acts on the highest stressed regions. Having discrete load-displacement data points from a testing

Preglednica 3: Matematične opredelitve regij mehanskega dela I–IV

Table 3: Mathematical definition of the mechanical work regions I–IV

Skupno dovedeno delo preizkusnega stroja (W_M) / Totally introduced work by the testing machine (W_M)	$W_M = \int_0^{s_{maks.}} F(s) ds \approx \sum_{s=0}^{s_{maks.}} F \Delta s$			
Regija / Region	I	II	III	IV
Vrednost / Denomination	W_{pl}^i	W_{pl}^{σ}	W_{el}^{σ}	W_{pl}^f
Delež energije krivulje / Curve energy portion	$\int_0^{s_c} F(s) ds$	$\int_{s_c}^{s_{\sigma}} F(s) ds$	-	$\int_{s_{\sigma}}^{s_{maks.}} F(s) ds$
Dodani (+) oz. odstranjeni (-) pogoji za elastično energijo / Added (+) or subtracted (-) elastic energy terms	$-\frac{F_c \cdot s_c}{2}$	$+\frac{F_c \cdot s_c}{2}$ $-\frac{F_{maks.}^2}{2C_{maks.}}$	$+\frac{F_{maks.}^2}{2C_{maks.}}$	-
W_s				

uporabljene za oceno pridobljenih krivulj obremenitve in odklona.

Nereverzibilni vnos energije v celoti opredeljujeta regiji II in IV: $W_{pl} = W_{pl}^{\sigma} + W_{pl}^f$. Nereverzibilno ali plastično delo deluje na najbolj obremenjene regije. Po pridobitvi diskretnih podatkov o obremenitvi in odklonu iz preizkusne naprave je treba oceniti W_s skladno z Enačbo 3:

$$W_s = W_M - W_{pl}^i =$$

$$= W_{el}^{\sigma} + W_{pl} = \frac{F_C \cdot S_C}{2} + \sum_{s=s_C}^{s_{maks.}} F \Delta s \quad (3)$$

Enačba 3 prikazuje pomembnost natančne opredelitev točke maksimalne togosti za pridobitev F_C in S_C na pravilen način.

Če povzamemo, je mogoče celotno dovedeno energijo zloma oceniti na podlagi neprekinjeno pridobljenih krivulj obremenitev, dokler ne pride do zloma še zadnje stične točke. Pri standardnem upogibnem testu peščenih jeder za livarsko industrijo tega ni bilo mogoče izvesti zaradi nestabilnih zlomov.

Slika 13 prikazuje rezultate mehanskega dela W_s na preizkušnem sistemu vezivnih sredstev za jedra, razdeljene na različne deleže dela.

Razvidno je, da je za CB-vzorke značilen največji delež plastičnega dela. Zanje je značilen upad plastične preoblikovalnosti v odvisnosti od časa. Za jedra z vezivnimi sredstvi HB in WB se večina dela elastično shrani v vzorcu. Prav tako ni očitnega končnega deleža plastičnega dela. Za CB-jedra je v primerjavi s HB-jedri in WB2-jedri značilna nižja upogibna trdnost, vendar potrebujejo več dela zaradi znatno večjega deleža plastičnega dela. To je lahko prednost, ki pomaga pri preprečevanju

machine, W_s has to be evaluated according to Equation 3:

$$W_s = W_M - W_{pl}^i =$$

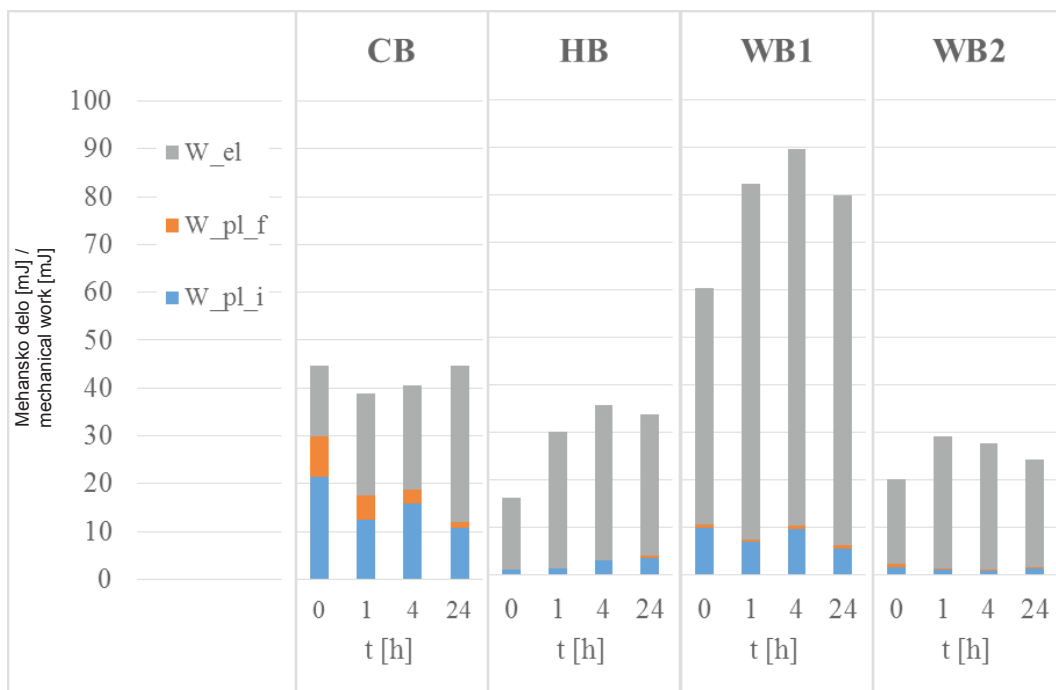
$$= W_{el}^{\sigma} + W_{pl} = \frac{F_C \cdot S_C}{2} + \sum_{s=s_C}^{s_{maks.}} F \Delta s \quad (3)$$

Equation 3 shows the importance of a precise maximum stiffness point definition in order to obtain F_C and S_C properly.

Summarized, the whole introduced fracture energy could be only evaluated from continuously acquired load curves until the last contact point broke. For the given standard foundry sand core bending test setup this was not achievable due to the observed non-stable fracturing.

It can be seen, that the CB-samples consume the highest plastic work portions. They show a plastic deformability with a decreasing trend over time. For HB and WB-bond cores the majority of work is elastically stored in the sample. Moreover, a distinct final plastic work portion is not visible. Compared to HB- and WB2-cores, CB-cores present lower bending strength but exhibit higher work consumption due to significantly higher plastic work portions. This can be an advantage to avoid core breakage but also implies a higher plastic deformation risk.

The absolute numbers reflect, that the WB1 samples take up the highest total work. The second highest work consumption is given by CB-cores, with their higher plastic work portions. HB and WB2-samples show lower consumed work than CB-cores.



Slika 13: Mehansko delo za vzorce v upogibnem testu. Začetno in končno plastično delo (W_{pl}^i , W_{pl}^f) in elastično delo (W_{el}) so posebej označeni za vsako vrst vezivnega sredstva v odvisnosti od časa shranjevanja

Figure 13: Mechanical work of bending test samples. Initial and final plastic work (W_{pl}^i , W_{pl}^f) and elastic work (W_{el}) are separately indicated for each binder type over the storage time t

zloma jeder, vendar pa hkrati predstavlja tudi večje tveganje plastične deformacije.

Iz absolutnih vrednosti je jasno, da potrebujejo vzorci WB1 največ skupnega dela. Sledijo CB-jedra, za katera je značilen velik delež plastičnega dela. HB-jedra in WB2-jedra potrebujejo manj dela od CB-jeder.

3.4 Ocena krhkosti vzorca

Predstavljena sta dva pristopa za opisovanje krhkosti peščenih jeder, prvi na podlagi oblike krivulje obremenitve in drugi na podlagi ocene dela.

3.4 Sample brittleness evaluation

Two approaches, one based on load curve shape and the other on the work evaluation, to describe sand core brittleness are presented.

For the load curve approach, stiffness and deformability are correlated. As illustrated in Figure 8, the relation between the secant stiffness $C_{sec} = F_{\sigma} / s_{\sigma}$ and the maximum stiffness C_{max} leads to the modulus based brittleness index B_M (Equation 4):

$$B_M = C_{sec} / C_{max} \quad (4)$$

V primeru pristopa na podlagi oblike krivulje obremenitve sta togost in preoblikovalnost soodnosni. Kot je prikazano na Sliki 8 pripelje razmerje med togostjo sekante $C_{sec} = F_{\sigma} / s_{\sigma}$ ter maksimalno togostjo C_{max} do indeksa krhkosti, osnovanega na modulu B_M (Enačba 4):

$$B_M = C_{sec} / C_{max} \quad (4)$$

Za oceno na podlagi dela opredeljuje elastično delo (Regija III na Sliki 12) v povezavi s celotnim delom na delu osnovan indeks elastičnosti B_W (Enačba 5):

$$B_W = W_{el}^{\sigma} / W_S \quad (5)$$

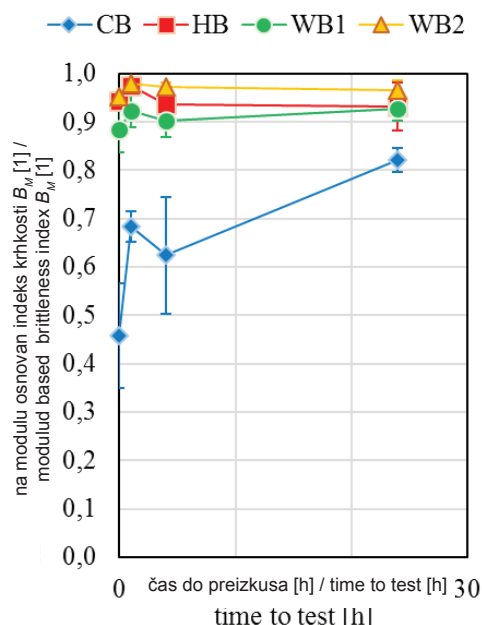
Tako vrednost B_M kot B_W sta brez dimenzij ter sta neodvisni od absolutne ravni trdnosti. Rezultate je mogoče primerjati z drugimi podobnimi upogibnimi testi, saj so vključeni tudi od velikosti odvisni parametri.

For the work based evaluation, the elastic work (Region III in Figure 12) related to the total work defines the work-based elasticity index B_M (Equation 5):

$$B_W = W_{el}^{\sigma} / W_S \quad (5)$$

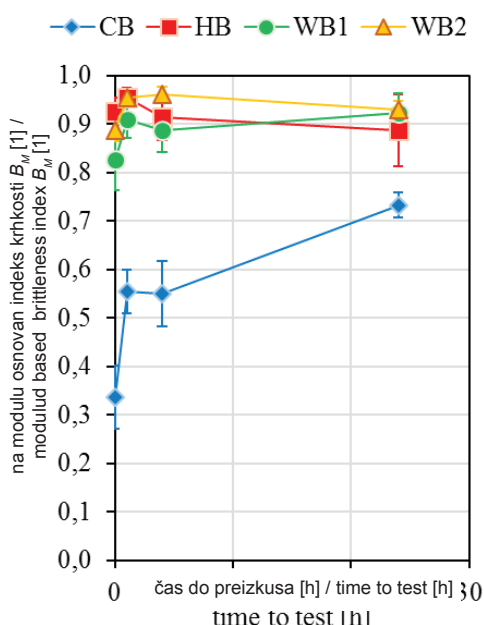
Both, B_M and B_W , are dimensionless and independent from the absolute strength level. Results may be compared among similar bending test setups, because size dependent parameters are incorporated.

Generally, the more a load curve is bowed, the lower is the brittleness index. For a completely linear load curve it would reach unity. Results for B_M are shown in Figure 14 and for B_W in Figure 15.



Slika 14: Rezultati na modulu osnovanega indeksa krhkosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 14: Modulus based brittleness index results for all tested cores over storage time



Slika 15: Rezultati na energiji osnovanega indeksa krhkosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 15: Energy based brittleness index results for all tested cores over storage time

Na splošno velja, da bolj, kot je krivulja izbočena, nižji je indeks krhkosti. Pri popolnoma linearni krivulji obremenitve bi bili krivulji enaki. Rezultati za B_M so prikazani na Sliki 14 in za B_W na Sliki 15.

Indeksi krhkosti na podlagi dela so malce nižji od tistih, osnovanih na modulu. Za Gb-jedra in WB-jedra so podani visoki indeksi krhkosti nad 0,85. V obeh ocenjevanjih se je za najbolj krhek sistem izkazal WB2. Izbočena oblika krivulje in višji delež plastičnega dela vodijo v nižje indekse krhkosti CB-sistema. Še posebej ob času 0 ur in vrednostih pod 0,5, ki so zanesljiv dokaz visoke stopnje preoblikovalnosti takšnih jeder. Iz teh ocen pa je očitna tudi potreba po previdni manipulaciji z jedri, da bi se izognili deformacijam.

V primeru CB-jeder končni delež plastičnega dela W_{pl}^f (Slika 13) znatno vpliva na vrednost W_s . Rezultati za B_W so prav tako nižji kot za B_M . Razlika za krhkejšie sisteme jeder z vročim strjevanjem ni bila opažena. Pri raziskavi materialov z določeno mero plastičnosti se je treba odločiti za delovni pristop, ki v oceni upošteva tudi končni del krivulje. Na modulu osnovana ocena odraža razmerja izključno do ravni maksimalne trdnosti.

3.5 Vpliv hitrosti obremenitve

Zaradi njihove visoke plastičnosti in časovne odvisnosti rezultatov so bila za preučevanje vpliva hitrosti obremenitve uporabljena CB-jedra. Nanje so delovale sile med 0,5–5 in 50 mm/min. V Preglednici 4 so prikazani rezultati v povezavi s hitrostjo obremenitve 0,5 mm/min, ki je bila pri prikazanih rezultatih konstantna.

Pri nizki hitrosti obremenitve 0,5 mm/min in posledičnem času upogibnega testa 1 min se trdnost in skupno delo zmanjšata za 20–25 % v povezavi z nazivno hitrostjo obremenitve 5 mm/min. Odklon

The work based brittleness indices are slightly lower than the modulus based ones. High brittleness indices of above 0.85 are given for HB- and WB-cores. The most brittle system from both evaluations is the WB2-system. The bent curve shape and the higher plastic work fraction lead to lower brittleness indices for the CB-system. Especially at the 0 hour-condition the values are below 0.5, giving evidence for a high deformability of those cores. Practically the need of a careful core manipulation to avoid deformations is obvious also from these evaluations.

For CB-cores the final plastic work portion W_{pl}^f (Figure 13) contributes significantly to W_s . The results for B_W are also lower than for B_M . Such a difference has not been observed as distinct for the more brittle hot hardened core systems. Investigating materials with some plasticity, the work based approach should be chosen, to include the final curve part also into the evaluation. The modulus based evaluation is reflecting the relations only until the maximum strength level.

3.5 Influence of load velocity

Due to their high plasticity and time dependency of the results, CB cores have been chosen to study the influence of load velocity. Load rates of 0.5 – 5 and 50 mm/min have been applied. In Table 4 the results are shown in relation to 0.5 mm/min load velocity, which was constant for the previously shown results.

For the low load velocity of 0.5 mm/min, resulting in about 1 min, bending test time, strength and total work are significantly decreased by 20 – 25 % related to the nominal load velocity of 5 mm/min. Deflection is decreased by about 10 %. However, the

Preglednica 4: Odvisnost lastnosti CB-jeder od hitrosti obremenitve (nizka: 0,5 mm/min, in visoka: 50 mm/min). Vrednosti so podane kot odstotki hitrosti 5 mm/min – referenčni rezultati. Vrednosti za 0 h, 1 h in 24 h so bile ocenjene za najmanj 5 vzorcev na podatek.

Table 4: Dependence of CB properties on the load velocity (low: 0.5 mm/min and high: 50 mm/min). Values are given as percentage of the 5 mm/min reference results. Values for 0, 1 and 24 h storage time were evaluated for a minimum of 5 samples per data point.

rezultati v [%] za vrednosti 0,5 mm/min / results in [%] of 0.5 mm/min values	upogibna trdnost / bending strength		odklon / deflection		modul elastičnosti / elastic modulus		skupno delo ob zlomu / total work at fracture		na modulu osnovan indeks krhkosti / mod. based br. index		na delu osnovan indeks krhkosti / work based br. index	
čas skladiščenja / storage time	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high
0 h	78	114	93	109	97	116	77	113	99	112	102	115
1 h	80	112	90	90	95	110	75	108	94	111	92	109
24 h	83	100	87	91	100	107	76	99	97	106	97	96

se zmanjša za pribl. 10 %. Vendar pa so moduli elastičnosti ter indeksi krhkosti blizu referenčnih vrednosti.

Pri visoki hitrosti obremenitve 50 mm/min in posledičnemu času upogibnega testa pod 1 s so povprečne vrednosti upogibne trdnosti, modul elastičnosti, delo preloma in krhkost merili nad 100 %, povprečni odklon pa se je malce zmanjšal.

Na kratko to pomeni, da nizke hitrosti obremenitve omogočajo plastično deformacijo vezi vezivnih sredstev skozi čas ter so posledično krivec za določeno mero plastičnosti peščenih jeder. To vodi v zmanjšano trdnost in delo zloma.

Pričakuje se, da bodo imeli takšni viskozni učinki manjši vpliv na bolj krhka peščena jedra s popolnoma strjenimi sistemi vezivnih sredstev Hotbox in Warmbox.

elastic modulus and the brittleness indices are close to the reference values.

For the high load velocity of 50 mm/min, resulting in a testing time below 1 s, mean values of bending strength, elastic modulus, work of fracture and the brittleness are above 100 % and average deflection is slightly decreased.

Summarized, very low load velocities permit plastic deformation over time of binder bridges and thereby permits a degree of plasticity in sand cores. This leads to decreased strength and work of fracture.

Such viscous effects are expected to have less effect for more brittle sand cores with fully hardened Hotbox and Warm-box binder systems.

4 Conclusions

The here presented study has demonstrated the potential to significantly enhance the evaluation of standard foundry sand core bending tests. Benchmarking of Cold-box-, Hot-box- and Warm-box bonded sand cores

4 Sklepi

V tem članku predstavljena študija je dokazala potencial za znatno izboljšanje ocenjevanje standardnih upogibnih testov

za pečena jedra v livarstvu. Primerjalna analiza spojenih peščenih jeder Coldbox, Hotbox in Warmbox je potrdila uspešno aplikacijo koncepta.

- Poleg obstoječih standardov v livarstvu je potrebno pridobiti tudi natančno krivulje obremenitve in odklona.
- Upogibno trdnost in modul elastičnosti je mogoče oceniti neposredno na podlagi neobdelanih krivulj obremenitev.
- Predobdelava krivulje obremenitve je ključna za odpravo začetnih učinkov usedanja vzorcev v smeri proti testnim nosilcem pred nadaljnjimi analizami, še posebej v primeru mehkih zrnatih materialov z vezivnimi sredstvi, kot so pečena jedra.
- Na podlagi predobdelanih krivulj obremenitve je mogoče oceniti odklon in mehansko delo, razdeljeno na elastično in plastično komponento.
- Krhkost je izražena s konceptom, osnovanim na podlagi modula oz. dela. Razmerja obeh konceptov so primerljiva.
- V primeru materialov z večjo plastičnostjo je bolje uporabiti na delu osnovan pristop.
- Pri nizkih stopnjah obremenitve se lahko zaradi viskoplastičnih učinkov trdnost in preoblikovalnost zmanjšata.

Omejitev koncepta predstavljajo nadkritični zlom vzorcev, podvrženih upogibnim testom skladno s standardi v livarski industriji, kar vodi v nestabilno širjenje razpok. Zato se priporoča raziskava specifičnega dela preloma, npr. preizkus cepljenja s klinom, ki sta ga razvila Harmuth in Tschegg (Harmuth in Tschegg, 1997). Ta se je izkazal za primeren koncept, s katerim je mogoče opredeliti heterogene materiale, kot so ognjevarne opeke ali betonski vzorci, kar je posledica izboljšane razmerja med površino preloma v primerjavi s prostornino vzorca.

proved the successful application of this concept.

- In addition to existing foundry standards the acquisition of a precise load-deflection curve is required.
- Bending strength and elastic modulus can be directly evaluated from non-treated load curves.
- A load curve pre-treatment is essential to eliminate initial settling effects of the samples towards the testing supports prior to further analyses in particular for soft bonded granular materials like sand cores.
- From pre-treated load curves deflection and mechanical work, divided into elastic and plastic portions can be evaluated.
- Brittleness has been expressed by a modulus based and a work based concept. Both deliver comparable relationships.
- For materials with higher plasticity the work based approach should be preferably applied.
- At low load rates strength and deformability may be reduced due to visco-plastic effects.

Limitations of the concept are given by the overcritical sample fracture of samples at bending test setups according to foundry standards, promoting instable crack propagation. Therefore it is proposed to investigate the specific work of fracture, e.g. by wedge split tests as developed by (Harmuth and Tschegg, 1997). This has been proven as a suitable concept to characterize heterogeneous materials like refractory bricks or concrete samples, due to an improved ratio of fracture surface to sample volume.

Future research should address sand core properties during the casting process, investigating the impact of thermal

Prihodnje raziskave bi se morale osredotočiti na vprašanje lastnosti peščenih jeder v postopku ulivanja ter na preučevanje učinka termalne izpostavljenosti ter na izhajajoče visokotemperaturne lastnosti. Prav tako bi se bilo treba osredotočiti na jedra z anorganskimi vezivnimi sredstvi. Takšna jedra predvidevajo kompleksnejši nadzor procesov, vendar nudijo prednosti na področju okoljevarstva in varnosti pri delu.

exposure and the resulting high temperature properties. Moreover, focus should also be put on inorganically bonded cores. These require a more complex process control while giving environmental and work hazard benefits.

Viri / Literature

- AFS, 1962. *Molding Methods and Materials*, 1st ed. American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illinois.
- Bindernagel, I., 1983. *Formstoffe und Formverfahren in der Gießereitechnik.pdf*, VDG-Taschenbuch. Verein Deutscher Gießereifachleute; Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Brown, J.R. (Ed.), 2010. *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, 11th ed. Butterworth-Heinemann. doi:10.1016/B978-075064284-2/50001-6
- Campbell, J., 2000. The concept of net shape for castings. *Mater. Des.* 21, 373–380. doi:10.1016/S0261-3069(99)00072-2
- Czerwinski, F., Mir, M., Kasprzak, W., 2015. Application of cores and binders in metalcasting. *Int. J. Cast Met. Res.* 28, 129–139. doi:10.1179/1743133614Y.0000000140
- Dietert, H.W., 1950. *Foundry Core Practice*. American Foundrymen's Society, Chicago, IL.
- Dong, S., Iwata, Y., Hohjo, H., Iwahori, H., Yamashita, T., Hirano, H., 2010. Shell Mold Cracking and Its Prediction during Casting of AC4C Aluminum Alloy. *Mater. Trans.* 51, 1420–1427. doi:10.2320/matertrans.F-M2010815
- Flemming, E., Tilch, W., 1993. *Formstoffe und Formverfahren*, 1st ed. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart.
- Gosch, R., Stika, P., 2005. Das ROTACAST-Gießverfahren - millionenfach für Aluminiumzylinderköpfe in der Serie bewährt. *Giesserei-Rundschau* 52, 170–173.
- Harmuth, H., Tschegg, E.K., 1997. A Fracture mechanics approach for the development of refractory materials with reduced brittleness. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 20, 1585–1603. doi:10.1111/j.1460-2695.1997.tb01513.x
- Kerber, H., Riegler, M., Schindlbacher, G., Schumacher, P., 2014. New possibilities with improved green sand testing facilities, in: Jan-Blažič, M. (Ed.), 54th International Foundry Conference. Slovenian Foundrymen Society, Portorož, Slovenia, p. 10.
- Langer, H.J., Dunnavant, W.R., 2011. Foundry resins. *Polym. Sci. Technol.*
- Lellig, K., Nolte, M., Kube, D., Gosch, R., Gröschel, A., Ragus, D., 2010. Neue Leichtbaukonzepte in Motorenkonstruktion und -bau: Antworten auf die veränderten Herausforderungen im modernen Fahrzeugbau, in: 37. Internationales Wiener Motorensymposium. Verein Deutscher Gießereifachleute; Giesserei-Verlag GmbH,

pp. 213–231.

- Motoyama, Y., Inoue, Y., Saito, G., Yoshida, M., 2013. A verification of the thermal stress analysis, including the furan sand mold, used to predict the thermal stress in castings. *J. Mater. Process. Technol.* 213, 2270–2277. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.06.024
- Quarzwerte, 2009. Quarzsand Haltern H 31 bis H 35, Quarzwerte Stoffdaten. D-50207 Frechen.
- Ratke, L., Brück, S., 2006. Mechanical properties of aerogel composites for casting purposes. *J. Mater. Sci.* 41, 1019–1024. doi:10.1007/s10853-005-3152-8
- Rice, J.R., 1968. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *J. Appl. Mech.* 35, 379–386.
- Schacht, C.A. (Ed.), 2004. *Refractories Handbook*. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel.
- Sobczyk, M., 2008. Untersuchung zur Nutzung der Vakuumtrocknungshärtung für die Herstellung und den Einsatz magnesiumsulfatgebundener Kerne für den Leichtmetallguss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- Stachowicz, M., Granat, K., Nowak, D., 2011. Influence of water-glass grade and quantity on residual strength of microwave-hardened moulding sands. Part 2 11, 93–98.
- Tarokh, A., Fakhimi, A., 2014. Discrete element simulation of the effect of particle size on the size of fracture process zone in quasi-brittle materials. *Comput. Geotech.* 62, 51–60. doi:10.1016/j.compgeo.2014.07.002
- Thole, J., Beckermann, C., 2009. Measurement of Elastic Modulus of PUNB Bonded Sand as a Function of Temperature, in: 63rd SFSA Technical and Operating Conference. Steel Founders Society of America, Chicago, IL, p. 22.
- VDG, 1999. Biegefestigkeit von warmhärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen. (No. P 71), VDG-Merkblatt. Düsseldorf.
- VDG, 1974. Beheizbares Formwerkzeug für die Herstellung von Biegestäben (No. M 11), VDG-Merkblatt. Düsseldorf.
- Weissenbek, E., Kautz, T., Brotzki, J., Müller, J., 2011. Zylinderkopffertigung der Zukunft - Ökologie, Ökonomie und Werkstoffoptimierung im Einklang. *Mot. Zeitschrift* 72, 484–489.
- Wolff, M.F.H., Salikov, V., Antonyuk, S., Heinrich, S., Schneider, G. a., 2013. Three-dimensional discrete element modeling of micromechanical bending tests of ceramic-polymer composite materials. *Powder Technol.* 248, 77–83. doi:10.1016/j.powtec.2013.07.009
- Zhou, X., Yang, J., Su, D., Qu, G., 2009. The high-temperature resistant mechanism of α -starch composite binder for foundry. *J. Mater. Process. Technol.* 209, 5394–5398. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.04.010
- Zwick_Roell, 2015. ProLine Tischprüfmaschinen Z005 bis Z100, Produktinformationen.