

Vpeljava simulacije v avtonomno optimizacijo

Simulation evolves to autonomous optimization

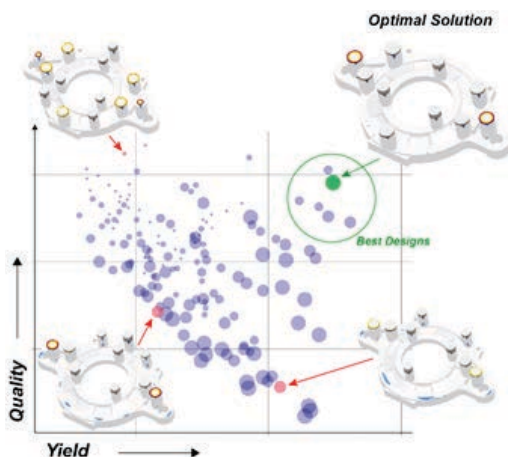
Po skoraj 30 letih, odkar je prisotna v industriji litja kovin, je simulacija procesa litja splošno sprejeto orodje tako v inženirskih oddelkih livarjev kovin kot pri oblikovanju orodja in ulitkov. Simulacije navadno izvajajo izkušeni tehniki – v rezultatih simulacije se zato zrcalijo njihove izkušnje s področja litja kovin kot tudi strokovno znanje. Vsako posamezno simulacijo lahko primerjamo z virtualnim poskusom. Na podlagi rezultatov simulacij ti inženirji na primer ocenijo, ali izbrani dovajalni sistem ali konfiguracija procesnih parametrov zagotavljajo sprejemljive kakovosti ulitka ob sprejemljivih stroških in nato predlagajo spremembe za iskanje boljših rešitev.

Pri postopku litja kovin se hkrati odvija mnogo med seboj tesno povezanih procesov. To je po eni strani sicer ključna prednost litja kovin v primerjavi z drugimi proizvodnimi procesi, vendar pa zahteva

Almost 30 years after its introduction into the metal casting industry, casting process simulation is a widely accepted tool in the engineering department of metal casters as well as in the design of tooling and castings. Simulations are typically performed by experienced technicians – the simulation results, therefore, reflect their metal casting experience, considerations and know-how. Each individual simulation is comparable to a virtual experiment. Based on the simulation results, these engineers evaluate e. g. whether a chosen rigging system or process parameter configuration leads to acceptable casting quality at acceptable costs and then propose changes to find improved solutions.

In the metal casting process, everything happens at the same time and is closely coupled. While this can be seen as a key advantage of metal casting over other manufacturing processes, it also makes decisions regarding the best, or at least an adequate, layout for a casting complex. Changing one process parameter, due to its interaction with other parameters, can have a multitude of impacts on the rest of the process and can influence the final casting quality in many different ways. This makes it challenging to manually optimize a casting process by evaluating the casting quality based on real-world trials and pursuing quality and economic objectives simultaneously.

Today's requirements on the development of a casting and the corresponding metal casting process



sprejemanje odločitev za zagotavljanje najboljših ali vsaj primernih načrtov v primeru izdelavi kompleksnih ulitkov. Izbira enega procesnega parametra zaradi njegove interakcije z drugimi parametri ima lahko večstranski vpliv na preostanek procesa ter na številne načine vpliva na končno kakovost ulitkov. Zato je ročna optimizacija procesa litja skozi oceno kakovosti ulitka na podlagi realnih preizkusov in hkratno prizadevanje za izpolnjevanje ciljev v zvezi s kakovostjo in gospodarnostjo še dodaten izziv.

Danes zahteve glede razvoja ulitkov in s tem povezani procesi litja kovin narekujejo metodologije in orodja, ki omogočajo največji izkoristek robustnosti in dobičkonosnosti procesa že v najzgodnejših fazah. Običajno se izvajanje izboljšav v praksi zmanjša na malo število dejanskih preizkusov v fazi razvoja, omejuje pa ga napor, povezan s spreminjanjem procesnih parametrov v serijski proizvodnji. Kvantitativno vrednotenje dejanske kakovosti ulitka na podlagi preizkusov litja ob zmanjšanem številu potrebnih preizkusov za optimizacijo procesa litja ostaja izziv.

Za razliko od preizkusov v praksi je avtonomna optimizacija s pomočjo simulacijskih orodij mnogo bolj prilagodljiva. Avtonomna optimizacija inženirjem omogoča sočasno in med seboj neodvisno spreminjanje več parametrov, npr. v zasnovi ulitka in načrtovanju procesa litja, individualno in kvantitativno pa je mogoče ovrednotiti tudi merila kakovosti. V kombinaciji z uveljavljenimi orodji za statistično načrtovanje preizkusov se lahko simulacija procesa litja uporablja za avtonomno optimizacijo procesov in zasnov litja [1]. Programska oprema hkrati upošteva več ciljev in je najboljši kompromis med njimi na podlagi temeljnih načel. Samodejna ocena vseh simuliranih meril kakovosti omogoča hitro in preprosto

demand methodologies and tools which allow a maximization of process robustness and profitability at the earliest possible point in time. Typically, the freedom to make improvements is in practice reduced to a small number of real trials during the development phase and is limited by the effort connected with changing process parameters in series production. A quantitative estimate of real casting quality based on casting trials and a reduction of the required number of experiments to optimize the casting process remains a challenge.

Opposed to real-world trials, autonomous optimization using simulation tools provides significantly more flexibility. Autonomous optimization enables engineers to modify several parameters, i.e. in the casting design and in the casting process layout, simultaneously and independently from each other, and quality criteria can be individually and quantitatively evaluated. Combined with established tools from statistical design of experiments, casting process simulation can be used to autonomously optimize casting processes and designs [1]. The software follows several targets simultaneously and finds the best compromise between them based on first principles. The automated assessment of all simulated quality criteria can be used to quickly and easily find the optimal route to achieve the desired objectives. In addition, the number of real-world trials can be reduced and the impact various process parameters have on reaching a robust process window can be assessed in early phases of casting, tooling and process development [2].

The new methodology of autonomous optimization is not a replacement for process knowledge and expertise. Based on the technical and economical boundary conditions for his process, the

iskanje optimalnih rešitev za uresničitev želenih ciljev. Prav tako je mogoče zmanjšati število preizkusov v realnem svetu, vpliv, ki ga imajo različni procesni parametri na doseganje okvirnega procesnega okna, pa je mogoče ovrednotiti v zgodnjih fazah litja, oblikovanja orodij in razvoja procesa [2].

Nova metodologija avtonomne optimizacije ne nadomešča znanja in izkušenj s procesi. Na podlagi tehničnih in gospodarskih mejnih pogojev za ta proces mora livarski inženir določiti, katere parametre lahko spreminja in v kolikšnem obsegu v kombinaciji z zahtevami glede litja ter cilji, ki jih mora doseči. Te cilje je mogoče izmeriti s povezovanjem z ustreznimi merili kakovosti. Vprašanja, ki jih je treba upoštevati pri programski opremi, so preprosta: Kaj pomeni dober odvajalni sistem? Kako dosežem robustno procesno okno? Kako izberem procesne pogoje, ki zagotavljajo zahtevano kakovost litja? Da bi lahko odgovorili na ta vprašanja, moramo razpolagati s kvantitativnimi opisi pomembnih vplivnih dejavnikov, izmerljivimi kazalniki kakovosti in stroškov ter cilji, ki jih je treba doseči. Tako kot optimizacija procesa litja v praksi je tudi avtonomna optimizacija osnovana na treh temeljnih komponentah (Slika 1):

- Spremenljivi procesni parametri (na zasnovo vezane spremenljivke)
- Izbrana merila kakovosti (izhodne vrednosti) kot izračunani kvantitativni rezultati
- Različni cilji

Do danes so orodja za simulacijo procesa litja inženirji v livarski industriji uporabljali za potrditev sklopa izbranih procesnih parametrov in oceno načrta litja. Inženirji nato izvedejo ročne spremembe v procesnih parametrih ali geometrijah, kot so razdelilniki, kanali ali orodja, da bi se čim bolj približali zastavljenim ciljem, postopek pa ponavljajo, dokler ne najdejo zadovoljive

foundry engineer needs to specify which parameters he has the flexibility to change and by how much, in combination with the requirements placed on the casting and the objectives to be achieved. These objectives are made measurable by relating them to corresponding quality criteria. The questions to be addressed to the software are simple: What characterizes a good gating system? How do I accomplish a robust process window? How do I select process conditions that provide the required casting quality? Quantitative descriptions of the important influencing factors, measurable quality and cost indicators, and the goals to be achieved are required to answer these questions. Just as when optimizing a casting process in the real-world, autonomous optimization uses the same three basic components (Figure 1):

- Variable Process Parameters (design variables)
- Selected Quality Criteria (output values), as calculated quantitative results
- Differing Goals (objectives)

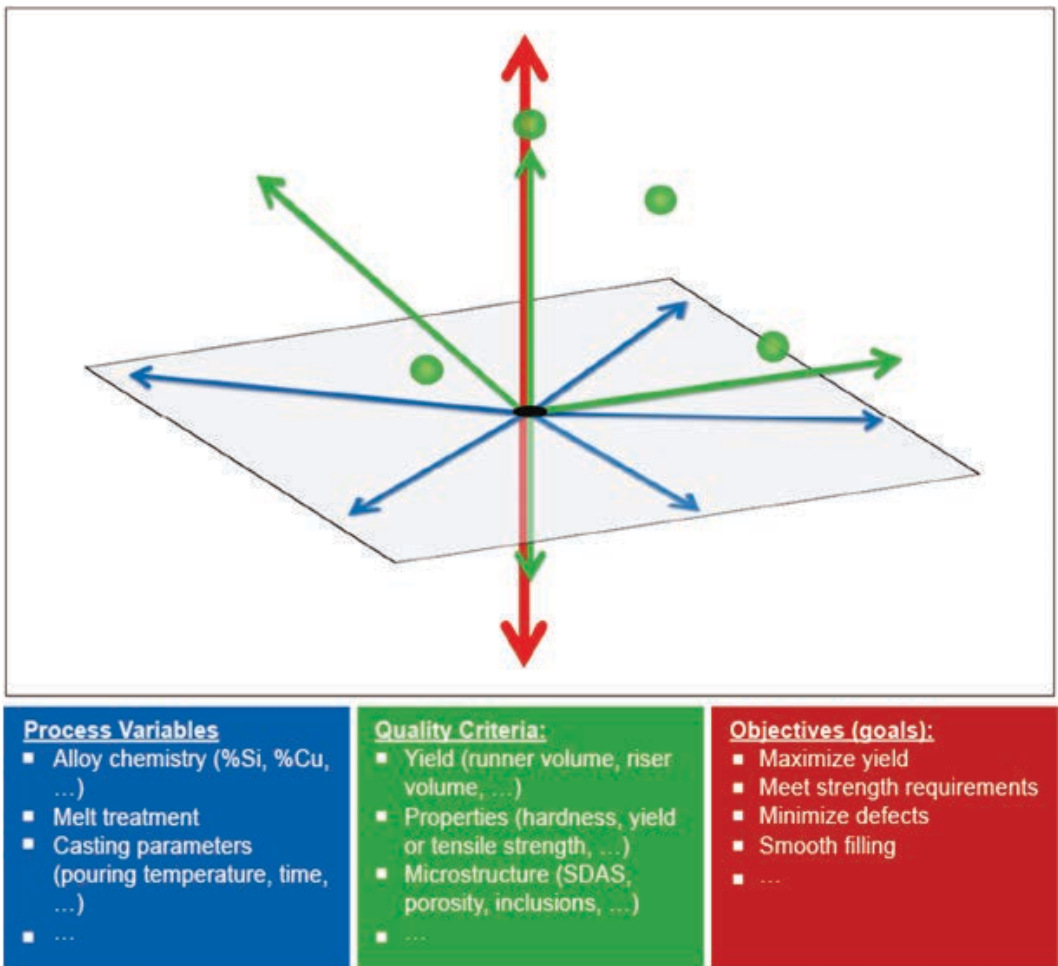
Up to today, casting process simulation tools have been used by metal casting engineers to confirm a set of selected process parameters and evaluate a given casting layout. They then make manual changes to process parameters or geometries, like runners, gates or tooling, to get closer to achieving the objectives they have in mind, and repeat this process until they find a solution with which they are satisfied. This step-by-step approach can be described as 1-dimensional, manual optimization (Figure 2).

In MAGMASOFT®, this internal loop (gray) is now fully automated. It can be expanded by setting up an autonomous design of experiments (autonomous DOE) where variable geometry and process parameters are predefined (blue). This creates a set of designs, which can be run

rešitve. Ta pristop dela po korakih lahko opišemo kot enodimenzionalno ročno optimizacijo (Slika 2).

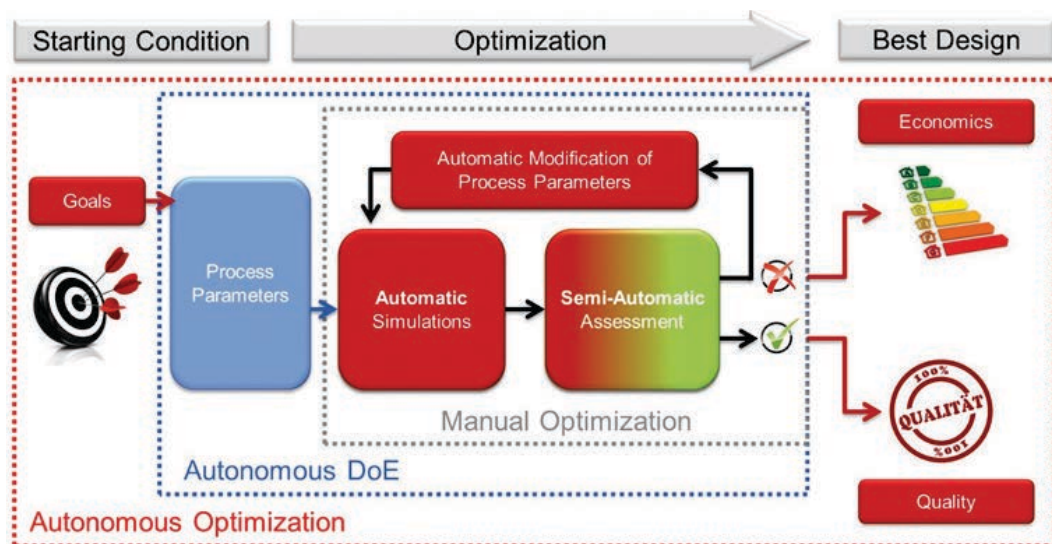
V družbi MAGMASOFT® je ta notranja zanka (siva) zdaj povsem avtomatizirana. Razširiti jo je mogoče z določitvijo avtonomnega načrtovanja eksperimentov (avtonomni DOE), kjer so spremenljiva

avtomatično to e.g. change the number, location and size of risers or change process related parameters or vary metal chemistry. For each virtual casting trial or design, the program automatically evaluates the defined quality criteria. These criteria can be based on any of the results available in MAGMA⁵, i.e. process information like



SI. 1: Virtualni prostor za avtonomno optimizacijo je sestavljen iz različnih procesnih parametrov, izračunanih meril kakovosti in optimizacijskih ciljev, opredeljenih v programski opreml.

Fig. 1: Virtual design space for autonomous optimization composed of varying process parameters, calculated quality criteria, and optimization goals defined in the software.



Sl. 2: Različne metodologije optimizacije za iskanje najboljše rešitve

Fig. 2: Various optimization methodologies for finding the best solution

geometrija in procesni parametri določeni vnaprej (modra). Tako se zagotovi niz zasnov, ki jih je mogoče samodejno zagnati npr. za spremembo števila, mest in velikosti napajalnikov ali spremembo s procesom povezanih parametrov ali za različne kemijske sestave kovin. Program samodejno oceni opredeljeno merilo kakovosti za vsak virtualni preizkus litja ali zasnove. Ta merila so lahko zasnovana na katerem koli rezultatu, ki je na voljo družbi MAGMA⁵, tj. procesni informaciji, kot je čas strjevanja, kakovostni informaciji, npr. o poroznosti ali ujetem zraku, ali opisu značilnosti lokalnih mikrostruktur in lastnosti, kot je razmik med dendritskimi vejami, število vozlov ali natezna trdnost.

Vključevanje ciljev vodi do celovite avtonomne optimizacije (rdeče), kjer so simulirane zasnove samodejno ocenjene glede na podlagi njihovega prispevka k ciljem, ki včasih niso enotni. To pomeni, da mora tako kot livar kovin pri svojem delu tudi program poiskati kompromise med različnimi zahtevami glede litja in

solidification time, quality information like porosity or entrapped air, or characterization of local microstructures and properties such as dendrite arm spacing, nodule count or tensile strength.

Integrating objectives leads to a complete autonomous optimization (red), where simulated designs are automatically assessed with regard to how they contribute to the, sometimes conflicting, objectives. Just like the metal caster in his daily work, this means that the program needs to find compromises between different demands on the casting and process (e.g. avoiding critical porosity while maintaining an acceptable yield). Using genetic algorithms and statistical tools, the program can follow these conflicting goals simultaneously and learn from the results of the virtual casting trials which are carried out.

The following are selected examples of how this new approach supports foundry engineers to systematically develop their process understanding to develop robust

procesa (npr. izogibanje kritični poroznosti ob ohranjanju sprejemljivega izkoristka). Z uporabo genetskih algoritmov in statističnih orodij lahko program hkrati sledi neenotnim ciljem in se uči iz rezultatov izvedenih virtualnih preskusov litja.

Spodaj so navedeni izbrani primeri, kako ta nov pristop podpira inženirje v livarski industriji pri sistematičnem razvoju njihovega znanja za razvoj robustnih načrtov in livnih procesov že pred vsakim litjem.

Ocena in optimizacija čistosti jeklenega ulitka

Čistost je ključno merilo, ki določa kakovost sodobnih jeklenih ulitkov. Aglomeracija vključkov na kritičnih predelih pogosto pomeni predolge čase čiščenja in lahko privede do nesprejemljivega zmanjšanja mehanskih lastnosti. Ulitki se zato pogosto zavržejo zaradi površinskih napak zaradi vključkov, ki se odkrijejo med strojno obdelavo.

Večino vključkov pri jeklenih ulitjih povzroči ponovna oksidacija kovine prek stika z zrakom med postopkom polnjenja form. Splošno znano je, da se livarski inženirji upirajo temu mehanizmu s pametno zasnovanimi odvajalnimi sistemi. Vedo, da vodijo počasen pretok in preprečevanje nastajanja zračnih žepkov med tokom kovine do bistveno večje čistosti.

Čistost realnih ulitkov lahko ocenimo samo s površinsko obdelavo, štetjem vključkov in statističnim ovrednotenjem dvodimenzionalnih vzorcev. Da bi preprečili uničenje vzorca, je treba preiskavo izvesti na posebej ulitih vzorcih, kar pomeni, da je ocenjena samo metalurška kakovost. Pomembni učinki lokalnih vzorcev pretoka znotraj jeklenega ulitka se popolnoma zanemarijo. Ocena preskusnega postopka porazdelitve nekovinskih vključkov je vselej

layouts and casting processes before the first metal is poured.

Assessment and optimization of cleanliness of a steel casting

Cleanliness is a key criterion determining the quality of modern steel castings. The agglomeration of inclusions in critical sections often means excessive cleaning times and can lead to an unacceptable reduction in mechanical properties. Castings are frequently scrapped due to inclusion related surface defects discovered during machining.

Most inclusions in steel castings are caused by re-oxidation of the metal through contact with air during the mold filling process. It is a well-known fact that foundry engineers counteract this mechanism with cleverly designed gating systems. They know that calm flow patterns and avoiding the creation of air pockets in the metal flow lead to significantly better cleanliness.

The cleanliness of a real-world casting can only be evaluated by surface machining, counting inclusions, and a statistical evaluation of two-dimensional samples. To avoid destroying the casting, this investigation may be carried out on separately cast samples, meaning that only the metallurgical quality is evaluated. The important effects of local flow patterns inside the steel casting are completely ignored. The experimental assessment of the distribution of non-metallic inclusions is always time and cost consuming and not practical to implement in production for each casting.

Autonomous DOEs and optimization, however, can be quickly run with minimal effort. They allow for the systematic variation and the quantitative evaluation of different gating layouts (Figure 3). In this example, the impact of gating design on the number and distribution of re-oxidation

zamudna in draga, prav tako pa njena izvedba med proizvodnjo posameznih ulitkov ni praktična.

Avtonomno načrtovanje eksperimentov in optimizacijo pa lahko izvedemo hitro in z minimalnim naporom. Omogočata sistematično spreminjanje in kvantitativno ocenjevanje različnih načrtov odvajanja (Slika 3). V tem primeru smo proučili zasnove odvajalnega sistema na število in distribucijo reoksidiranih vključkov na površini jeklenega ulitka. Programska oprema je obdelala dvanajst različnih predpripravljenih načrtov odvajanja. Vsaka simulacija v sklopu avtonomnega načrtovanja je bila določena in izračunana brez vsake interakcije uporabnika programske opreme, rezultati pa so bili ocenjeni na podlagi zadevnih meril kakovosti. Na Sliki 3 so v paličnem grafikonu prikazane različne zasnove in razvrščene glede na čistost površine. To omogoča hitro izbiro dobrih in slabih zasnov, kajti vezane so na to kakovostno merilo. Dobri (3) in manj učinkoviti (10) odvajalni sistemi so prikazani na Sliki 3, vsak poleg ustreznega simuliranega rezultata čistosti površine.

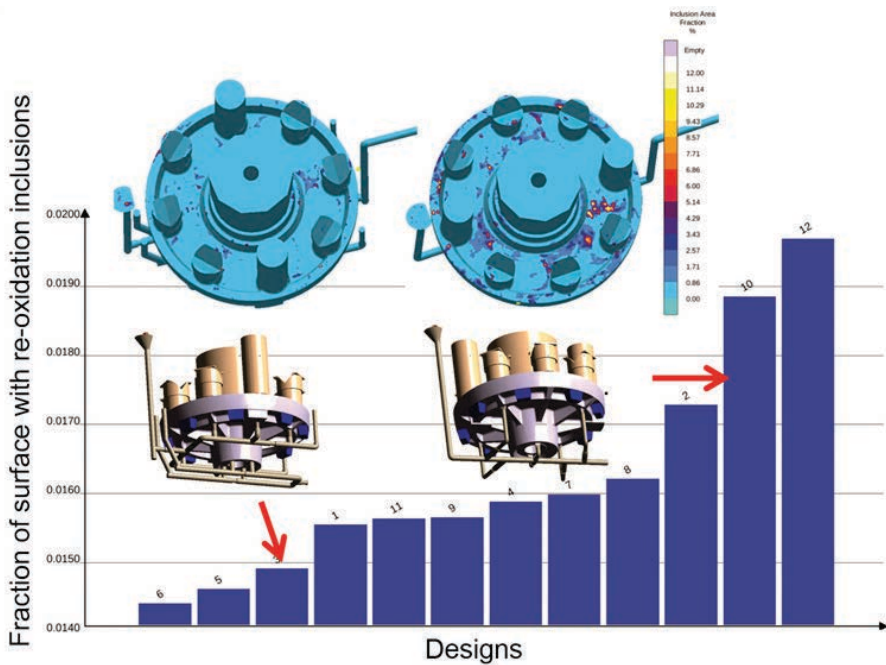
Na Sliki 4 je ocena kakovosti površine štirih izbranih zasnov. Prikazano je dodatno kakovostno merilo, tj. stopnja zvrtnjenosti med postopkom polnjenja. Zlahka ga je mogoče oceniti na podlagi obsega površine na prednji strani kovine, ki je bila dovzetna za oksidacijo med polnjenjem. Zasnova z največjim številom površinskih vključkov ima tudi najbolj zvrtnjen vzorec polnjenja. Ta graf znova potrjuje splošno sprejete soodnosnosti med mirnim vzorcem polnjenja in večjo čistostjo. Avtonomna optimizacija omogoča hitro in varno oceno količinskih meril kakovosti. Primerjalno vrednotenje rezultatov avtonomne optimizacije omogoča določitev soodnosnosti med procesnimi parametri in merili kakovosti.

inclusions on the surface of a steel casting was investigated. The software ran twelve different previously prepared gating designs. Without any interaction of the software user each simulation in the autonomous DOE was set up, calculated, and its results were assessed based on relevant quality criteria. The different designs are shown in the bar chart in Figure 3 and ordered according to their surface cleanliness. This allows for a fast selection of good and bad designs as they relate to this quality criterion. A good (#3) and a less effective (#10) gating system are displayed in Figure 3, each adjacent to its respective simulated surface cleanliness result.

Figure 4 assesses the surface quality of four selected designs. As an additional quality criterion, the degree of turbulence during the filling process is shown. This can be easily evaluated using the amount of surface area on the metal front which was available for oxidation during filling. The design with the most surface inclusions also shows the most turbulent filling pattern. This chart reconfirms the commonly accepted correlation between a quiet filling pattern and better cleanliness. Autonomous optimization provides the opportunity to quickly and safely assess quantitative quality criteria. The comparative evaluation of autonomous optimization results allows the determination of correlations between process parameters and quality criteria.

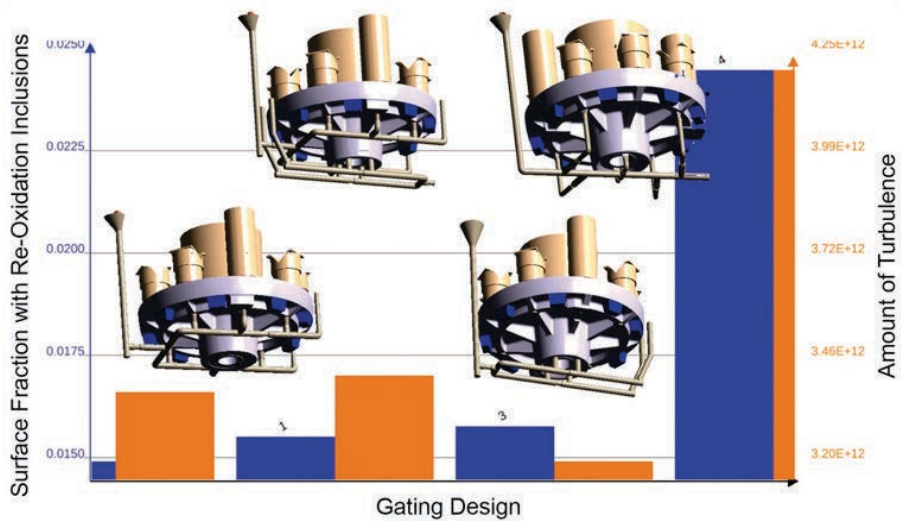
Riser optimization for a planetary gear carrier

Autonomous optimization allows foundry engineers to locally assess casting quality based on any quantitative quality criteria. Combining this with the flexibility to vary almost any casting process and design related parameters opens nearly unlimited



SI. 3: Samodejna in kvantitativna ocena več zasnov ulivnih sistemov v odnosu s kakovostjo površine

Fig. 3: Automatic and quantitative assessment of several gating designs as they relate to surface quality



SI. 4: Ocena kakovosti površine in turbulenc med polnjenjem pri štirih zasnovah odvajanja

Fig. 4: Assessment of surface quality and turbulence during filling for 4 gating designs

Optimizacija napajalnika nosilca planetnega gonila

Avtonomna optimizacija livarskim inženirjem omogoča lokalno oceno kakovosti ulitka na podlagi kvantitativnih meril kakovosti. Skupaj s prilagodljivostjo za prilagajanje skoraj vseh postopkov litja in parametrom v povezavi z načrti se odpre skoraj neomejena paleta možnosti glede ocenjevanja najpomembnejših dejavnikov, ki vplivajo na kakovost litja, in za določitev optimalne konfiguracije za proizvodnjo.

V tem primeru je optimizirana konfiguracija napajalnika za izdelavo nosilca planetnega gonila iz nodularne litine (Slika 5). Napajanje kritičnega območja prirobnice (prekinjena rdeča črta) omogoča kombinacija napajalnikov na zgornji strani in več hladil zunaj tega predela in pod njim. Dodatna spremenljivka je možnost zvečanja debeline predela pod napajalniki (obloga), kar privede do različnih načrtov.

Več parametrov je bilo spremenjenih, da bi lahko ocenili, kateri pomembno vplivajo na poroznost pri krčenju na kritičnem predelu. Proučevali smo zlasti vpliv velikosti napajalnikov, velikosti obloge in konfiguracije hladila zunaj kritičnega območja in pod njim. To je privedlo do avtonomnega načrtovanja eksperimentov (DOE) z 32 avtonomnimi možnostmi zasnove s programsko opremo.

Rezultati načrtovanja eksperimentov (Slika 6) nakazujejo vpliv, ki ga ima vsaka sprememba parametra na ocenjevano merilo kakovosti, tj. obseg poroznosti med krčenjem prirobnice. Vsak označevalec v grafu raztrosa predstavlja eno zasnovo in je rezultat vsake posamezne simulacije.

Rezultati nakazujejo, da je pri vseh spremenjenih parametrih mogoče doseči nizko raven poroznosti. Jasno je razvidno, da konfiguracija hladila bistveno vpliva na poroznost pri krčenju. Načrt z največjim številom hladil na desni strani Slike 6 vselej

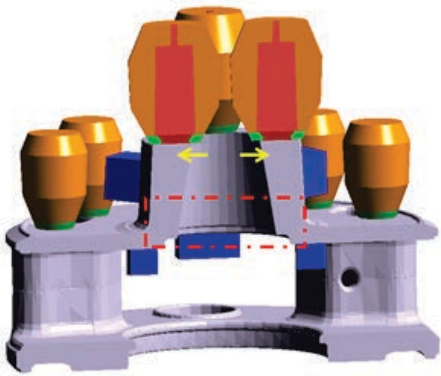
options to evaluate what the most relevant factors influencing casting quality are and to determine the optimal configuration for production.

The risering configuration of a ductile iron planetary gear carrier is optimized in this example (Figure 5). The feeding of the critical flange area (dashed red line) is provided by a combination of top risers and several chills outside and below this area. An additional variable is the option to increase the wall thickness of the area below the risers (padding), leading to several different layouts.

Several parameters were varied to assess which of them has a significant impact on the shrinkage porosity in the critical area. Specifically, the influence of the size of the risers, the size of the padding, and the chill configuration outside and below the critical area were investigated. This led to an autonomous design of experiments (DOE) with 32 designs run autonomously by the software.

The results of this DOE (Figure 6) show the impact each parameter variation has on the evaluated quality criteria, the amount of shrinkage porosity in the flange. Each marker in the scatter diagram represents one design and is the result of an individual simulation.

The results indicate that for all of the varied parameters, a low level of porosity can be achieved. It can be clearly seen that the chill configuration has a significant impact on the shrinkage porosity. The layout with the maximum number of chills on the right of Figure 6, always leads to the least amount of shrinkage defects, regardless which other variations are made. In this respect, this solution is robust to variations in other production conditions. As to expected, increasing the size of the padding also narrows the scatter in the



Sl. 5: Prerez nosilca planetnega gonila iz nodularne litine ter konfiguracija napajalnika in hladilne kokile; rdeča prekinjena črta označuje kritično območje; rumene puščice označujejo mesta, kjer je mogoče zvečati debelino stene ulitka

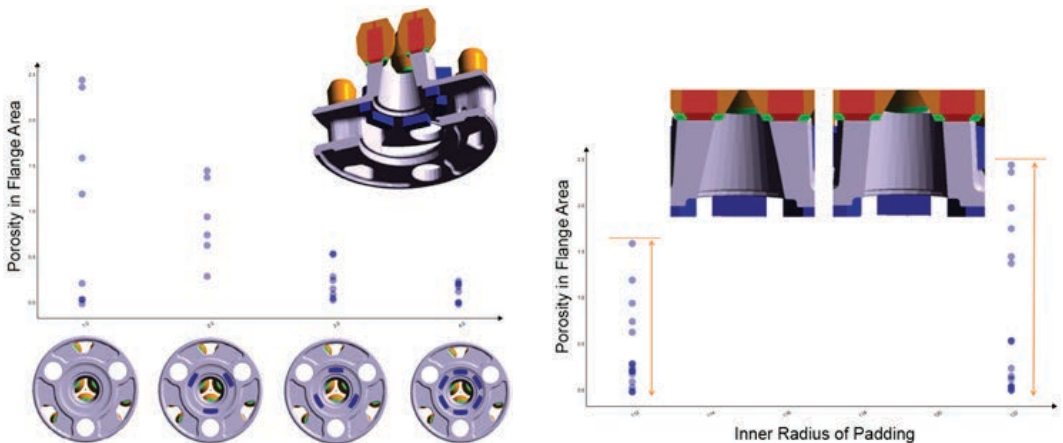
Fig. 5: Cut view of a ductile iron planetary gear carrier and its riser and chill configuration; the red dashed line depicts the critical area; the yellow arrows show where the wall thickness of the casting can be increased

privede do najmanjšega števila okvar pri krčenju ne glede na ostale spremembe. To pomeni, da ta rešitev ni dovoljna za spremembe drugih proizvodnih pogojev. Po pričakovanjih tudi večje število oblog zmanjša raztros v obsegu okvar, vendar pa ima manjši vpliv kot spreminjanje hladil.

Z uporabo avtonomnega načrtovanja eksperimentov (DOE) postane jasno, kateri parametri pomembno vplivajo na kakovost litja in kam mora livarski inženir usmeriti svojo pozornost (v tem primeru na

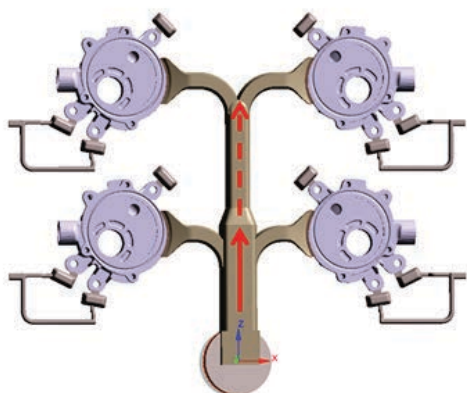
range of defects, but its impact is smaller than that of changing the chills.

Using an autonomous DOE, it becomes clear which parameters have a significant effect on the casting quality and where the foundry engineer should focus in on (in this



Sl. 6: Vpliv konfiguracije hladilne kokile (levo) in obloge (desno) na poroznost pri krčenju v kritičnem predelu

Fig. 6: Impact of chill configuration (left) and padding (right) on shrinkage porosity in the critical area

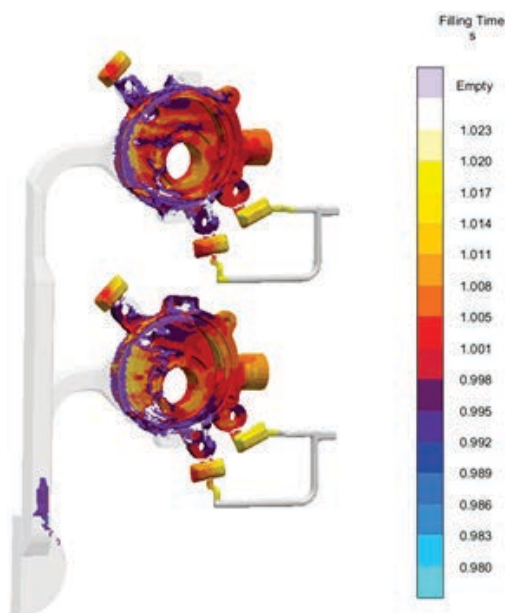
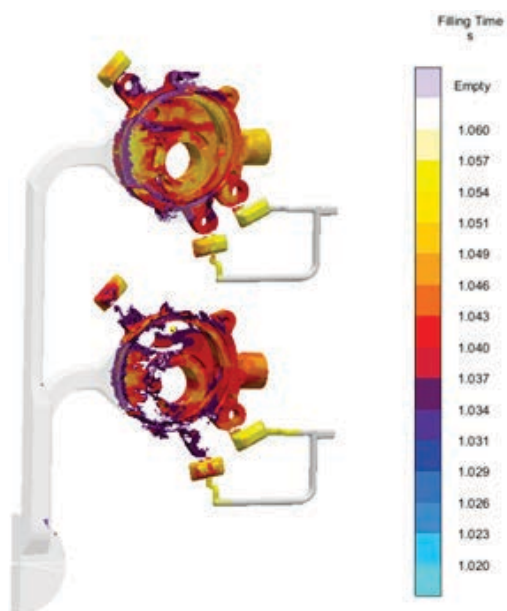


Sl. 7: Spreminjanje presečnega položaja razdelilnega kanala pri visokotlačnem litju

Fig. 7: Variation of the position of the cross-section change in a high pressure die casting runner

Sl. 8: Časi lokalnega polnjenja za dva položaja krčenja razdelilnega kanala. (Ker je ulitek simetričen, je prikazana samo polovica.)

Fig. 8: Local filling times for two different positions of runner contraction. (Due to symmetry only one-half of the casting is shown.)



konfiguracijo hladila), da bi poiskal končno in optimalno konfiguracijo.

Sočasna avtonomna optimizacija zasnove razdelilnega kanala in krivulje litja pri tlačnem litju

Ker sta konceptualna zasnova razdelilnega in odvajalnega sistema ter določitev livnih

case the chill configuration) to find the final and optimal configuration.

Simultaneous autonomous optimization of runner design and shot curve for a die casting

Since the conceptual design of the runner and gating system and the determination of the casting process parameters for a

procesnih parametrov pri tlačnem litju tesno povezana, se morata geometrija razdelilnega kanala in potek polnjenja votline v livnem postopku vselej ujemati. Kot primer smo v tem delu proučili vpliv sočasnega spreminjanja zasnove razdelilnega kanala in krivulje vbrizgavanja na posledično kakovost ulitka pri tlačnem litju v štiri votline.

Presek razdelilnih sistemov pri ulitkih, izvedenih z visokotlačnim litjem, se navadno z oddaljevanjem od livnega ostanka manjša. Zasnova razdelilnega kanala za ta primer (Slika 7) je avtonomno optimizirana s spreminjanem mesta presečnega krčenja razdelilnega kanala med spodnjo in zgornjo votlino (oglejte si neprekinjeno in prekinjeno rdečo črto na Sliki 7). Položaj presečnega krčenja pomembno vpliva na vedenje ulitka med polnjenjem, še posebej na enakomerno polnjenje votlin. To je pomemben predpogoj za ponovljivo proizvodnjo visokokakovostnih ulitkov.

Slika 8 prikazuje lokalni čas polnjenja pri dveh spremembah presečnega območja razdelilnega kanala. Ulitek je simetričen, zato je prikazana samo njegova desna stran. Načrt na levi prikazuje bistveno spremenjene čase polnjenja zgornjih in spodnjih votlin. Načrt na desni strani je v tem smislu očitno boljši, kajti pri obeh votlinah lahko opazimo skoraj identično vedenje.

Za sočasno preiskovanje vpliva na posledično polnjenje pri spremembah geometrije razdelilnega kanala in pospeševanje bata med vbrizgavanjem smo spreminjali tako položaj krčenja razdelilnega kanala kot čas pospeševanja vbrizga od počasnega do hitrega.

Izvedli smo avtonomno načrtovanje eksperimentov z 98 različnimi zasnovami, vse spremembe geometrij in krivulj litja so bile avtonomno ustvarjene, simulirane in nato ocenjene.

die casting are closely coupled, the runner geometry and the progress of cavity filling for a given casting always have to match. As an example, here the simultaneous variation of the runner design and the shot curve on resulting casting quality for a four-cavity die is investigated.

The section size of runner systems for high pressure die castings is usually smaller, the farther it is from the biscuit. The runner design for this example (Figure 7) is autonomously optimized by varying the location of the runner cross-sectional contraction between the bottom and top cavities (see solid and dashed red lines in Figure 7). The position of the cross-section reduction has a significant influence on the filling behavior of the castings, in particular whether the four cavities are filled uniformly. This is an important pre-condition for the reproducible production of high quality castings.

Figure 8 shows the local filling times for two different variations of the runner cross-section area change. Utilizing the symmetry, only the right side is shown. The layout on left shows significantly different filling times in the top and bottom cavities. The layout on the right is obviously better in this respect, as the cavities show a nearly identical filling behavior.

In order to simultaneously investigate the influence on the resulting filling of variations in runner geometry and the acceleration of the piston during the shot, both the position of the runner contraction and the time for acceleration of the shot from slow to fast speeds were varied.

An autonomous DOE with 98 distinct designs was performed, where all geometry and shot curve variations were autonomously generated, simulated, and then assessed.

The piston velocity profile versus piston travel is shown in the upper section of Figure

Profil hitrosti bata v primerjavi s potjo bata je prikazan v zgornjem delu Slike 9. Čas začetka faze pospeševanja za proučevane zasnove je bil vselej med navpično zeleno in modro črto. V spodnjem delu Slike 9 je graf z glavnimi učinki, ki prikazuje vpliv spreminjanja začetka faze pospeševanja (zgornji graf) in vpliv spreminjanja mesta krčenja razdelilnega kanala (spodnji graf) na razlike med časi polnjenja livnih votlin. Manjša kot je razlika, enakomernejše je polnjenje votlin. Vsak označevalec v grafu z glavnimi učinki prikazuje eno povprečno vrednost vseh simulacij avtonomnega načrtovanja preizkusov za določeno točko pospeševanja ali mesto krčenja razdelilnega kanala. Naklon črt predstavlja pomembnost zadevnih procesnih parametrov za izbrano merilo kakovosti. Večji kot je naklon, večji je vpliv.

Ti rezultati pomenijo, da vodi poznejši začetek pospeševanja do večje razlike pri polnjenju votlin. Učinek mesta krčenja razdelilnega kanala je v primerjavi s tem relativno šibak. Večje kot je krčenje, bolj enakomerno poteka polnjenje votline. Ta primer kaže, da spreminjanje enega procesnega parametra vselej vpliva na druge procesne pogoje ali odločitve, vezane na zasnovo litja in orodja.

Avtonomna optimizacija nosilnega okvirja za toplotno obdelavo konstrukcijskega litja [3]

Orodja za simulacijo livnega procesa lahko predvidijo preostanek obremenitev in posledično deformacijo ulitkov skozi celotni proizvodni proces, vključno s procesom toplotne obdelave. Ta primer prikazuje, kako lahko avtonomno načrtovanje eksperimentov in optimizacijo uporabimo za preprečevanje deformacij tudi pri kompleksnih konstrukcijah tlačno litih delov.

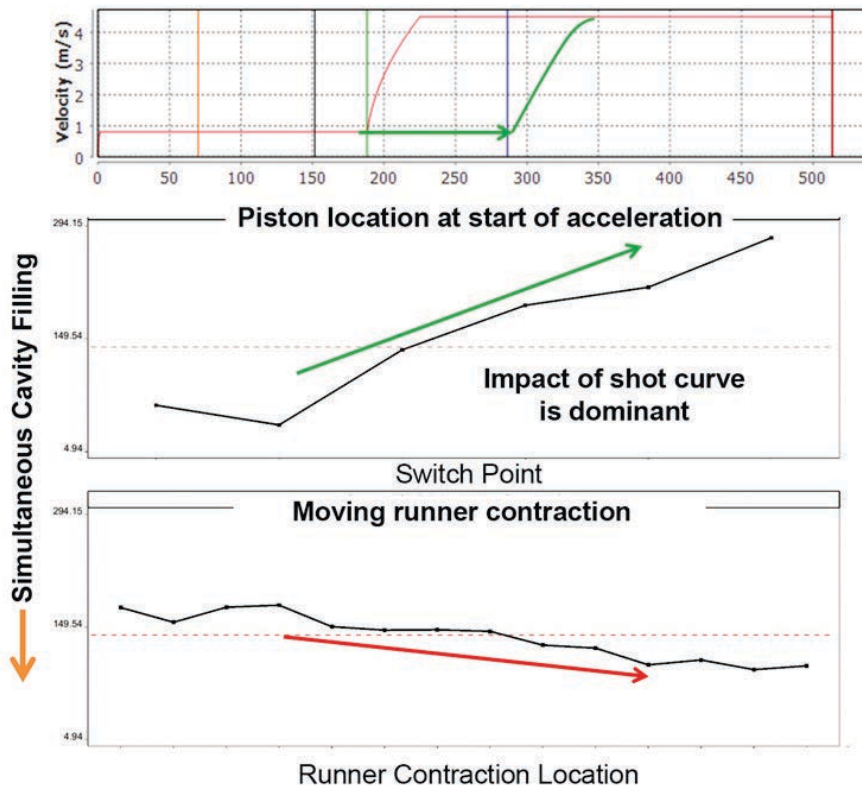
9. The time of the start of the acceleration phase for the investigated designs was always between the vertical green and blue lines. The lower section of Figure 9 shows main effect diagrams, depicting the impact of changing the start of the acceleration phase (upper diagram) and the impact of moving the runner contraction location (lower diagram) on the differences between the filling times of the casting cavities. The smaller this difference, the more uniformly the cavities are filled. Each marker in a main effect diagram represents one average value of all simulations of the autonomous DOE for a specific acceleration point or runner contraction location. The incline of the lines represents the significance of the respective process parameter on the selected quality measure. The steeper the incline, the greater the impact is.

These results show that starting the acceleration at a later point in time leads to increasing difference in the filling of the cavities. In comparison, the effect of the runner contraction location is relatively weak. The higher the contraction is the more uniform the filling of the cavity.

This example shows that changing one process parameter always has an impact on other process conditions or on decisions regarding casting and tooling design.

Autonomous optimization of a support frame for the heat treatment of a structural casting [3]

Casting process simulation tools can predict residual stresses and the resulting distortion of castings over their entire manufacturing process, also including the heat treatment process. This example illustrates how an autonomous DOE and optimization can be used to minimize the distortion of even complex die-cast structural part.

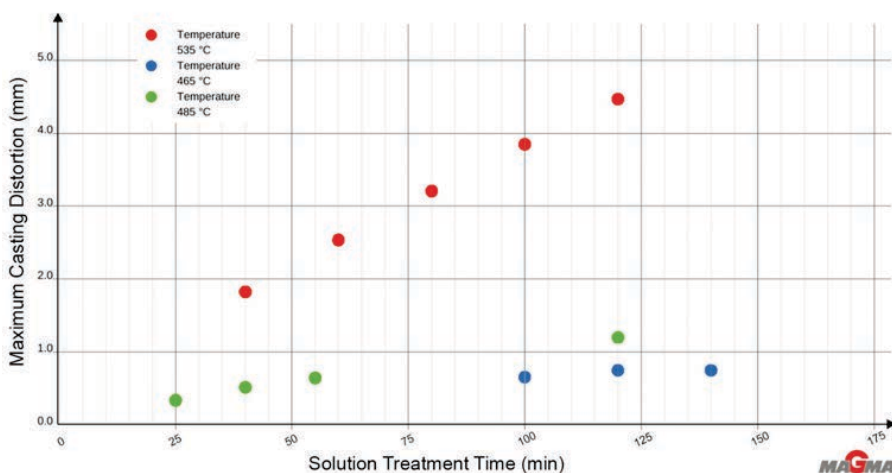


SI. 9: Spreminjanje krivulje polnjenja (zgoraj) in grafi z glavnimi učinki za vpliv v točki preklopa (med dvema fazama) v krivulji strela (sredi) ter višino krčenja razdelilnega kanala (spodaj) na enakomerno polnjenje vseh votlin

Fig. 9: Variation of the shot curve (top) and main effect diagrams for the influence of switch-over time in the shot curve (middle) and height of the runner contraction (bottom) on the uniform filling of all the cavities

Obdelava v raztopini je prvi korak toplotne obdelave aluminijastih ulitkov T6/T7. Zaradi nizke trdnosti materiala blizu temperature solidusa in na podlagi vpliva gravitacijskega učinka na litje pri tem proizvodnem koraku vselej obstaja nevarnost trajne plastične deformacije pri tankostenskih konstrukcijskih ulitkih. Slika 10 kvantificira razmerje med različnimi temperaturami obdelave v raztopini in časi z izračunano deformacijo konstrukcijskega avtomobilskega ulitka. Očitno je nagibanje

Solution treatment is the first step in a T6/T7 heat treatment for aluminum castings. Due to the low strength of the material close to the solidus temperature, and through the influence of gravity acting on the casting, there is always the danger of creating a permanent plastic deformation in a thin-walled structural casting during this process step. Figure 10 quantifies the relationship between different solution treatment temperatures and times with the calculated distortion of a structural automotive



Sl. 10: Proučevanje največjih deformacij tlačno litega konstrukcijskega dela med toplotno obdelavo pri različnih temperaturah in časih raztopnega žarjenja z virtualno zasnovo poskusov

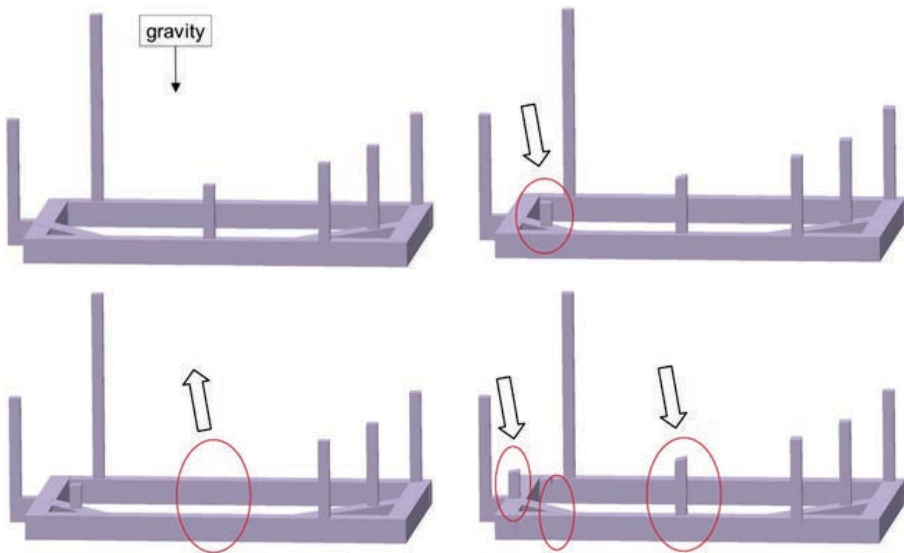
Fig. 10: Virtual Design of Experiments investigating the maximum deformation of a die cast structural part during heat treatment for different solution treatment temperatures and times.

proti večjim deformacijam pri daljših časih obdelave pri isti temperaturi. To pomeni, da virtualno eksperimentiranje ne zagotavlja samo možnosti izvedbe kvantitativne ocene za določitev specifikacij komponente, temveč tudi potencial za vzpostavitev robustnih procesnih pogojev in energijskih prihrankov že med razvojem izdelka.

Ulitek je med toplotno obdelavo na nosilnem okvirju. Določitev ustreznih stičnih točk med okvirjem in ulitkom je za dimenzionalno stabilnost izjemno pomembna. Uresničevanje cilja po dodatnem zmanjšanju obsega deformacij z optimizacijo položajev stičnih točk med ulitkom in nosilnim okvirjem se začne že z izbiro najprimernejše temperature in časa obdelave v raztopini. Za oceno različnih možnosti za položaje stičnih točk smo uporabili avtonomno načrtovanje eksperimentov (Slika 11).

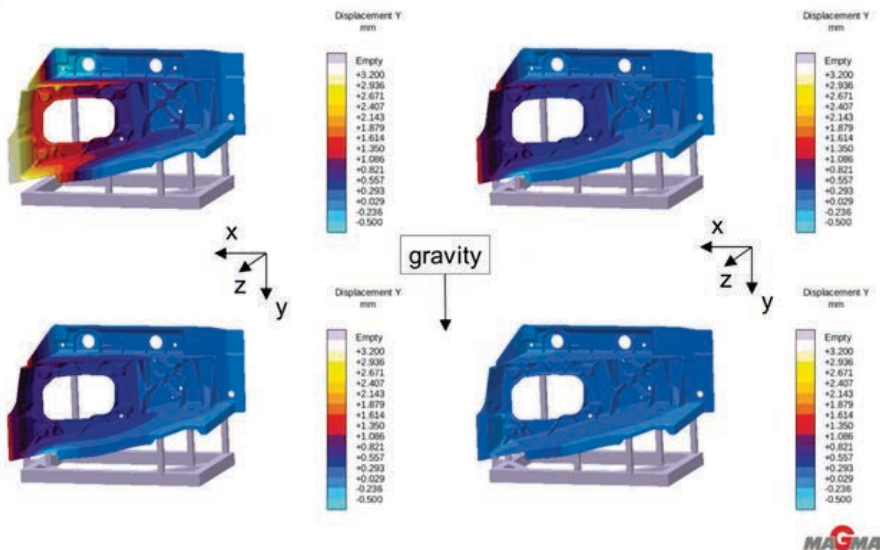
casting. The clear tendency towards higher deformations for longer treatment times at the same temperature level becomes obvious. Hence, virtual experimentation not only provides a means quantitative assessment to realize the component's specifications. It also offers the potential to establish both robust process conditions and energy savings already during product development.

The casting is positioned on a support frame during heat treatment. Finding appropriate contact points between the frame and casting is extremely important for achieving dimensional stability. Starting from the selected best solution treatment temperature and time, the objective was to further reduce the amount of distortion by optimizing the positions of the casting/frame contact points. An autonomous DOE was set up to evaluate different options for the positions of the contact points (Figure 11).



SI. 11: Štiri različne zasnove nosilnih okvirjev za čim manjšo deformacijo pri toplotni obdelavi

Fig. 11: Four different support frame designs for minimizing heat treatment distortion



SI. 12: Deformacija konstrukcijskega tlačnega ulitka med raztopnim žarjenjem, ko je na štirih različnih nosilnih okvirjih, kot je prikazano na Sliki 14

Fig. 12: Distortion of a structural die casting during solution heat treatment when placed on the four different support frames shown in Figure 14

Na Sliki 12 so prikazani rezultati deformacij pri izbranih zasnovah okvirjev. Jasno je razvidna deformacija dela zaradi gravitacije. Pri prvem nosilnem okvirju (zgoraj levo) je vidna deformacija velikosti 3,2 mm na prednjem levem predelu. Ob dodajanju opore v prednjem levem kotu (zgoraj desno na Sliki 12) se pokažejo znaki bistvenega izboljšanja. Naslednja zasnova (spodaj levo) kaže, da odstranitev enega od nosilcev na prednji strani nima skoraj nobenega vpliva. Od prikazanih položajev premik prednjega levega nosilca nazaj in tudi v levo privede do najmanjše deformacije v obsegu pribl. 0,5 mm (spodaj desno).

Povzetek

Več vzorcem smo uporabili, da bi prikazali, kako lahko uporabimo celovito integracijo avtonomne optimizacije v orodju za simulacijo livnega procesa MAGMA⁵ za zagotovitev optimiziranih in robustnih načrtov ulitkov ter procesnih oken pred litjem prve kovine. Programska oprema poišče najboljše možne procesne parametre, optimalni razdelilni kanal, položaje in mere odvoda, pa tudi mesta in velikosti napajalnikov in hladil. Livarski inženirji lahko avtonomno optimizacijo uporabijo kot virtualno okolje za eksperimentiranje, da bi hkrati uresničili različne s kakovostjo in stroški povezane cilje.

Cilj ohranitve uporabniku prijaznega simulacijskega orodja ob integraciji te nove tehnologije smo dosegli z uvedbo zmožnosti ustvarjanja parametričnih oblik in samodejnega spreminjanja parametrov skupaj z orodjem za statistično analizo avtonomnega načrtovanja eksperimentov in genetičnih algoritmov za avtonomno optimizacijo. Sočasna ocena rezultatov livarskim inženirjem omogoča enostavnejšo primerjavo in vrednotenje rezultatov iz

Figure 12 shows the distortion results for some selected frame designs. The distortion of the part due to gravity can be seen clearly. The first support frame (upper left) shows a distortion of 3.2 mm in the left front area of the part. Adding an additional support in the front left corner (upper right in Figure 12) already shows a significant improvement. The next design (lower left) shows that the removal of one of the supports in the front has almost no effect. Of the shown positioning options, moving the left front support backwards and even more to the left leads to the smallest distortion of around 0.5 mm (lower right).

Summary

Several examples have been used to show how the complete integration of autonomous optimization in the casting process simulation tool MAGMA⁵ can be used to ensure optimized and robust casting layouts and process windows before the first metal is poured. The software searches for the best possible process parameters, optimal runner and gate positions and dimensions, as well as locations and sizes of risers and chills. Foundry engineers can use autonomous optimization as a virtual field for experimentation, to simultaneously achieve different quality and cost targets.

The goal to retain the user-friendliness of the simulation tool, while integrating this new methodology, was achieved through the implementation of capabilities for parametric geometry creation and automatic parameter variation, together with tools for statistical analysis of autonomous designs of experiments and genetic algorithms for autonomous optimization. The simultaneous assessment of the derived results enables the foundry engineer to easily compare and evaluate outcomes from numerous

številnih simulacij. Jasno so prikazane odvisnosti med zasnovo in procesnimi spremenljivkami, merili kakovosti in cilji.

Trideset let po uvedbi simulacije procesa litja lahko livarski inženirji kombinirajo posamezne simulacije, avtonomna načrtovanja eksperimentov in avtonomne optimizacije za boljše razumevanje procesov in vzpostavitev robustnih livnih procesov, ki zagotavljajo kakovostne ulitke po najnižji ceni.

simulations. Dependencies between design and process variables, quality criteria and objectives are clearly visualized.

Thirty years after the introduction of casting process simulation, foundry engineers now can combine single simulations, autonomous DOEs and autonomous optimizations to gain better process understanding and to establish robust casting processes making quality castings at the lowest possible cost.

Viri / Literature

- [1] Hahn, I., Sturm, J. C.: Versuchspläne in der gießtechnischen Simulation, GIESSEREI 96 (2009), št. 7
- [2] Bramann, H., Pavlak, L.: Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung durch virtuelles Experimentieren mit der Gießprozess-Simulation. GIESSEREI 102 (2015), št. 2
- [3] Gaspers, H.J., Thorborg, J.: Design Optimization of Heat Treatment Support Frames for Aluminium Alloy Structural Cast Parts using Virtual Experimentation, European Conference on Heat Treatment (2015), Benetke, Italija, maj 2015.