

Digitalisering i støberiteknologi, del 2

Anvendelseseksempler til procesoptimering

Databaserede metoder gør det muligt at håndtere produktionsprocessernes kompleksitet og at forstå nye årsagssammenhænge. Academic Association of Foundry Technology (AKAGuss), stiller her gerne deres fælles udviklede ekspertise til rådighed. I denne sidste af to artikler om digitalisering i støberiteknologi beretter Technische Universität Clausthals Institut for Metallurgi, Danmarks Tekniske Universitets Institut for Mekanisk Teknologi, Münchens Tekniske Universitets Institut for Omformningsteknik og Støberiteknologi og Kassel Universitets Institut for Produktionsteknik og Logistik-Fagområde for Støberiteknologi om konkrete, støberispecifikke anvendelseseksempler.

AF BABETTE TONN, LUDWIG TONN, JULIUS GOGOLIN, CLAUSTHAL, NIELS S. TIEDJE, GIOVANNI DI MUOIO, LYNGBY, DANMARK, PHILIPP LECHNER, CHRISTOPH HARTMANN, PATRICIA ERHARD, WOLFRAM VOLK, MÜNCHEN UND ADAM P. FROS, MARTIN FEHLBIER, KASSEL

Digitalisering af produktionen vil bidrage væsentligt til overlevelsesmulighederne for den tyske industri. Det gælder især for de støberier med komplekse processer, hvor det ikke altid er muligt at forudsige støbegodskvaliteten ved hjælp af konventionelle metoder. Databaserede metoder gør det muligt at mestre denne kompleksitet og også at forstå nye årsagssammenhænge. I en artikel i to dele vil Academic Association of Foundry Technology (AKAGuss) gerne give eksempler på anvendelser af disse databaserede metoder. I den første del (bragt i Støberiet Nr. 1- marts 2022, red.) omtaltes de forskellige medvirkende forskningsinstitutternes digita-

liseringsaktiviteter. I denne del beskrives konkrete eksempler på, hvordan typiske processer i støberiindustrien kan forbedres og optimeres ved hjælp af databaserede metoder. Der er bevidst valgt at vise et bredt udsnit af emner for at appellere til et bredt publikum.

Tekniske Universität Clausthal, Institut for Metallurgi

Brug af kunstig intelligens til at forudsige grafitdegeneration.

Motivering

Et vigtigt grundlag for at kunne overholde de krævede mekaniske egenskaber i komponenter fremstillet i SG-jern er, at grafitten hovedsageligt svarer til form V og VI i DIN EN ISO 945-1. Imidlertid kan der opstå degenereret grafit i svære godstykker på grund af de lave størkningshastigheder samt på grund af jernets legeringselementer og følgestoffers grafit-hæmmende virkning [1]. Dette re-

sulterer i en øget kærnfølsomhed og de nødvendige styrkeegenskaber kan ikke længere opnås (fig. 1 a og b).

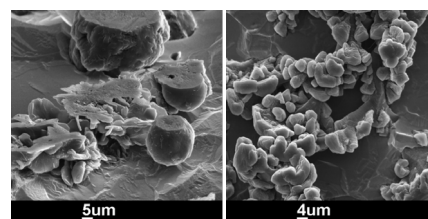


Fig. 1: SEM-billeder af degenereret grafit i ferritisk SG-jern, a) intercellulær grafit og b) chunky grafit, dybætsning med HNO₃

De kritiske indhold af grundstofferne, der kan resultere i degenereret grafit, afhænger i høj grad af størkningshastigheden og sammenspillet med andre grundstoffer. Indtil videre findes der dog ingen absolutte entydige grænseværdierne for skadelige grundstoffer i støbejern. Det har derfor været vanskeligt, at kunne forudsige forekomsten af degenereret grafit alene på basis af jernets kemiske

sammensætning, eller at undgå forekomsten ved at tilpasse processen.

Algoritmer til forudsigelse af degenereret grafit

Ud over udviklingen af fysiske modeller til at forudsige degenereret grafit, kommer der i stigende grad i fokus på maskinlæring. Ved hjælp af et omfattende datasæt med kemiske sammensætninger og støbegodsets relevante vægtykkelser kan computermodeller arbejde på en sådan måde, at de kan forudsige typen af degenereret grafit uden at kende de kemisk-fysiske sammenhænge mellem forskellige legerings- og sporstoffer og grafitdannelsen.

Til dette formål blev to forskellige algoritmer til at generere en forudsigelsesmodel afprøvet i vores egne undersøgelser. Med K-nærmeste-na-boer (kNN) algoritmen [2] forsynes flere datasæt med n inputparametre med en hændelse i et n -dimensionalt koordinatsystem. For at finde et ud-sagn om et datasæt med en ukendt hændelse, indtastes denne i samme koordinatsystem, og der søges efter de punkter, der er nærmest. For at opnå den højeste mulige sikkerhed med denne tilgang, er det vigtigt, at datasættene dækker et meget stort spektrum af variationer. I figur 2 er kNN-algoritmen illustreret i et todimensionelt koordinatsystem ved hjælp af eksempler på $k=5$ og $k=13$, som fører til forskellige resultater. Det er tydeligt, at valget af k har en væsentlig betydning for modellens nøjagtighed.

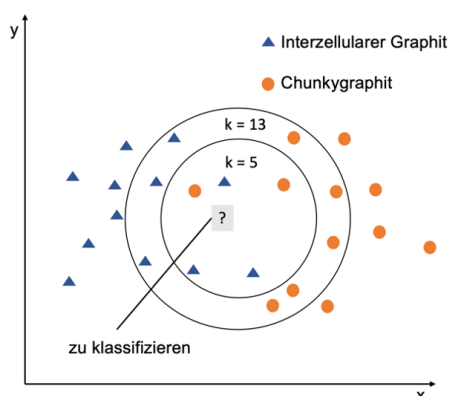


Fig. 2: Repræsentation af kNN-algoritmen i et todimensionelt koordinatsystem

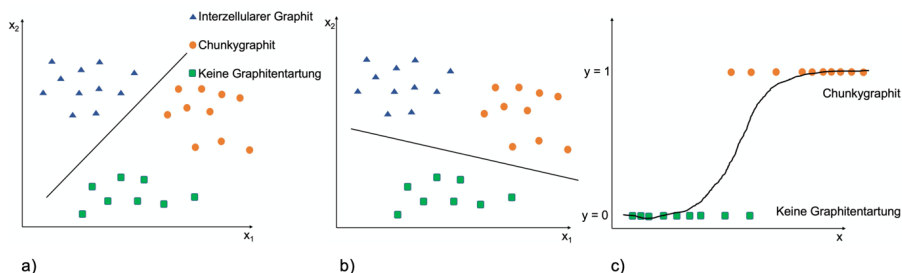


Fig. 3: a) og b) adskillelse af hændelser, c) binær logistisk regression

Multinomial logistisk regression [3] blev brugt som en yderligere algoritme til klassificering af de tabelopstillede datasæt. I denne analyseres datasættet i en flertrinsalgoritme, se figur 3.

Datasættene for to hændelser er adskilt fra hinanden, og sandsynligheden for en hændelse forudsiges ved hjælp af binær logistisk regression. Ved at kombinere resultaterne er det muligt at skelne mellem mere end to hændelser, således at sandsynligheden for forekomsten af chunky, spiky eller kuglegrat kan forudsiges.

Indtil videre er 130 forskellige datasæt, hver med 30 inputparametre (kemisk sammensætning af SG-jern og relevant vægtykkelse af den støbte komponent) fra tre støberier og fra undersøgelser på Teknisk Universitet Clausthal blevet anvendt til at danne modellerne. Modellerne blev derefter afprøvet med 25 testdata, som ikke er en del af træningsdataene. Begge modeller er i stand til at klassificere grafitmorfologien med en nøjagtighed på omkring 80 % ved hjælp af testdatasættet med kemisk sammensætning og repræsentativ godsvægttykkelse. Nøjagtigheden af klassificeringen er 78 % for kNN-modellen og 83 % for multinomial logistisk regression.

Sammenfatning og konklusion

Begge modeller, baseret på godsets kemiske sammensætning og relevante godsvægttykkelser, er velegnede til at forudsige forekomsten af degenereret grafit. For at forbedre sandsynligheden på en korrekt forudsigelse af degenereret grafit, er det dog nødvendigt at bruge et væsentligt større antal træningsdatasæt

og en større variation af datasæt, så mere komplekse algoritmer også kan tages i anvendelse. Ved hjælp af yderligere data vil det i fremtiden være muligt at danne et neuralt netværk, som ud over blot sammenligning også kan genkende reelle faktabaserede sammenhænge og selv kan behandle "eksotiske" data og muligvis endda give indikationer på en fysisk sammenhæng.

Yderligere information:

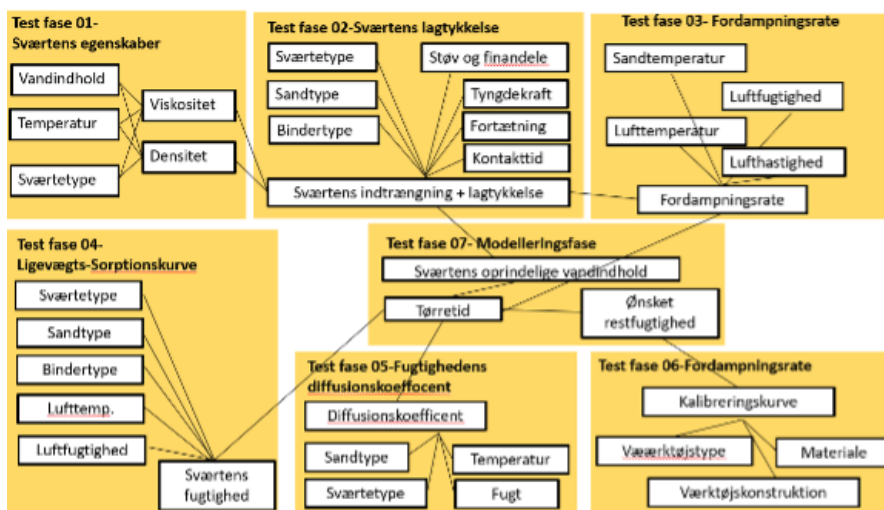
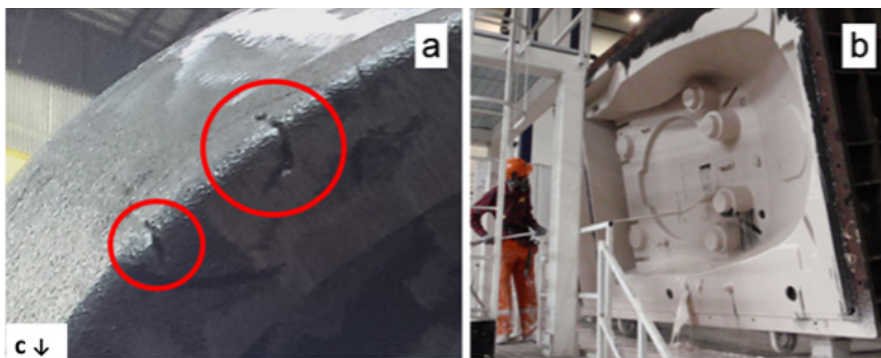
Babette.tonn@tu-claushal.de
Julius.gogolin@tu-claushal.de
www.imet.tu-claushal.de

Danmarks Tekniske Universitet - Institut for Mekanisk Teknologi

Udvikling af en metode til at forudsige og påvirke eksperimentelt baserede sværteegenskaber.

Baggrund og introduktion

Sværter anvendes til at forbedre støbegodsets overfladekvalitet og til at formindske overfladefejler. For at minimere sundheds- og sikkerhedsrisici samt til at forbedre arbejdsforholdene i støberier anvendes i stigende grad vandbaserede sværter, se fig. 4. For at optimere sværteprocessen har man hos DTU udviklet en metode til at forudsige sværtens lagtykkelse samt vandindhold af sværten på store furansandforme. En grundlæggende betingelse var, at metoden skulle være nem og hurtig at bruge, så responstiden korresponderede med produktionshastigheden i støberiet. Af denne grund er det ikke realistisk at bruge en komplet 3D-model til numerisk at simulere tørringen af en rigtig furansandform inden for



Figur 4: a) Eksempel på en fugtrelateret støbefejl, b) Sværtning af en furanbundet sandform, c) Parametre, der påvirker dampdannelse i en støbeprocess og metoder til styring af det endelige fugtindhold.

den tid, der er til rådighed i produktionen. I stedet blev det besluttet at bruge en mindre kompliceret, såkaldt "low-fidelity"-model (model med lav nøjagtighed, red.) som et første trin, der beskriver de vigtigste procesparametres virkninger på vandindholdet i sværlaget.

Modeludarbejdelse

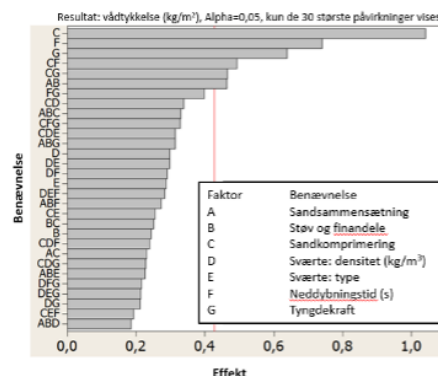
At skabe en low-fidelity model kan synes forholdsvis simpelt, men der er nogle kritiske punkter at overveje. For det første er der en lang liste af potentielt kritiske procesparametre, men hvilke der er vigtigst og hvordan de interagerer er ikke kendt. For det andet var der ingen standardtestmetoder til sådanne undersøgelser, hvorfor der skulle udvikles og bygges et passende afprøvningsanlæg. Endelig var der intet måleudstyr til nøjagtigt at kunne måle fugtigheden i sværlaget.

Eksperimenter; planlægning og udførelse

Formålet med den første forsøgsrække var at identificere de vigtigste procesparametre og deres typiske variationsområder. Som vist i figur 4c blev denne proces opdelt i tre separate sæt afprøvninger, der hver for sig fokuserede på en del af sværteprocessen [4], [5]. Forsøgene fokuserede på sværtens egenskaber, sværtens påføring samt tørreprocessen. Afprøvningerne blev designet og udført som fraktioneret faktorielt design for at begrænse antallet af eksperimenter, samtidig med at anden- og tredjeordens interaktioner kunne overvejes.

For eksempel var formålet med den anden forsøgsrække at bestemme, hvordan sværlagets egenskaber påvirkes af procesvariable. De betragtede egenskaber var: sværtens våd- og tør-lagtykkelse, vandindhold, sværtens

gennemtrængningsgrad og sandets densitet. De betragtede procesvariable var: sværtens densitet, bindemiddelsystem, tyngdekraft, støvindhold, sandkomprimering og prøvernes neddykningstid i sværten. [5]



Figur 5: Procesparametrenes indflydelse på sværlagets tykkelse.

Figur 5 viser de forskellige faktors virkning på sværtens lagtykkelsen. Pareto diagrammet viser tydeligt, at faktorer som sandkomprimering, neddykningstid og tyngdekraft er afgørende for at kunne kontrollere sværtens lagtykkelse. Det er interessant at vide, at den sammenkoblede effekt af disse 3 parametre er vigtigere end andre nøglefaktorer såsom sværte type eller andel af finandele i sværten. Dette illustrerer nytten af statistiske designs, som hjælper til at reducere antallet af nødvendige eksperimenter, samtidig med at det giver indsigt i komplekse interaktioner mellem procesfaktorer.

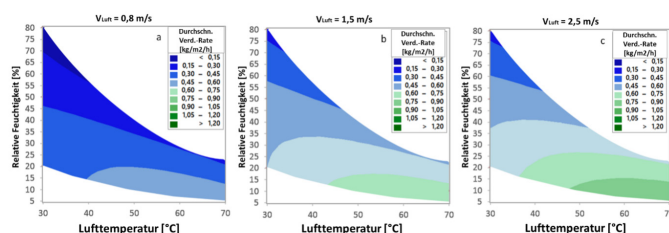
Resultater og konklusioner

Målet var, baseret på principperne for grundlæggende fysik og kemi, at skabe en model, der er enkel og hurtig nok til at bruge online i produktionen. På baggrund af forsøgene var det muligt at lave en simpel model, der beskriver sværtens gennemsnitlige fugtindhold som funktion af tørretid, temperatur, fugtighed og luftfugtighed over formoverfladen, se ligning 1. [5], [6] Med denne model blev der udviklet en simpel metode, der gør det muligt at forudsige tørretiden for furansandforme under hensyntagen til variationer i det omgivende miljø og tørreprocessen.

Ligning 1

$$ER_{avg} = -0,556 + 0,4022V_{air} + 0,02264 T_{air} + 0,01611 RH^2 - 0,1031 V_{air}^2 \\ - 0,000178 T_{air}^2 - 0,000085 RH^2 + 0,004368 V_{air} T_{air} \\ - 0,001980 V_{air} RH - 0,000371 T_{air} RH$$

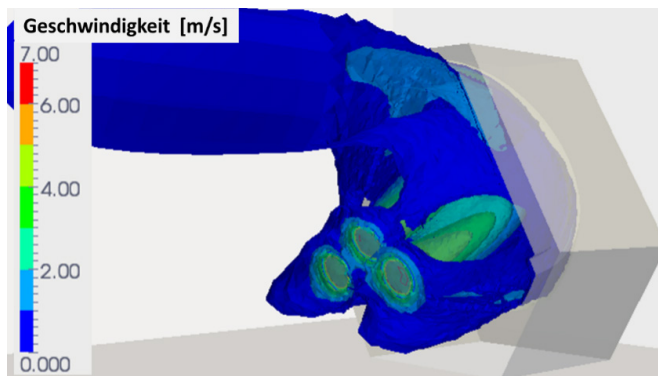
For at kunne sammenligne de beregnede værdier med produktionsdata var det nødvendigt at udvikle en fugt-sensor med tilstrækkelig opløsning og nøjagtighed til at kunne måle de fugtværdier, der er typiske i furansand-forme. Sensoren er designet til håndholdt at kunne udføre tilfældige kvalitetskontrolmålinger eller den kan indkapsles i store forme for således at kunne levere online data om formens fugtindholdet til automatisk overvågning af sværtelaget [5].



Figur 6: Designplaner for gennemsnitlige fordampningshastigheder ved lufthastigheder på 0,8 m/s (a), 1,5 m/s (b) og 2,5 m/s (c).

Restfugtmodellen kan bruges i kombination med en fugt-sensor til at planlægge og overvåge tørreprocessen i furansandforme (fig. 6). Desuden blev der udviklet en procedure for den praktiske implementering af modellen i støberier [6].

Den meget enkle "low fidelity" model til simulering af tørreprocessen tager ikke højde for sandformens kompleksitet og dens effekt på den lokale lufthastighed. Det kan dog inkorporeres i komplekse "high-fidelity"-modeller i CFD-simuleringssoftware (fig. 7), hvor det kan bruges til at forudsige lokalt fugtindhold i en produktionsfacilitet, hvilket bliver et uvurderligt værktøj i tørringsprocesdesign [7].



Figur 7: Iso-overfladen af lufthastighed [m/s]. Luftstrømmen fra ventilatorerne kanaliseres ind i hulrummet.

Yderligere information:

nsti@mek.dtu.dk

www.mek.dtu.dk

Münchens Tekniske Universitets Institut for Omformningsteknik og Støberiteknologi

Databaseret kompensation af geometriske afvigelser ved additiv kernefremstilling.

Motivering

Ved additiv fremstilling (Additive Manufacturing-AM, også kaldt 3d-print, red.) generelt og fremstilling af støbeforme og -kerner i særdeleshed forekommer ofte utilsigtede dimensionsafvigelser mellem beregnet og faktisk opnået måleværdi. Dimensionsafvigelser, der ikke kan forhindres ved justering af procesparametrene, skal der kompenseres for. Denne kompensation udføres i henhold til den nyeste teknologi både manuelt og baseret på erfaring.

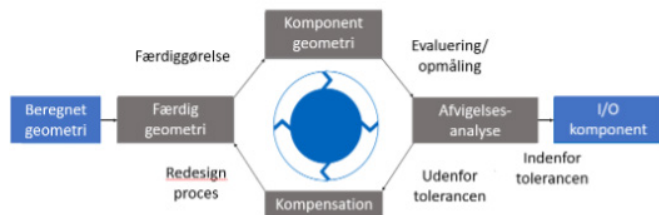
Til serieproduktion i en AM-proces fremstilles (printes) flere identiske komponenter normalt på samme platform. Da de fysiske forhold og dermed også de dimensionsafvigelser der opstår afhænger af komponenternes placeringen på platformen, kræver manuel kompensation for hver position på platformen en stor indsats. Ved ændringer i processen eller på komponenten skal kompensationen revideres, hvilket understreger behovet for en automatiseret metode

Databaseret afvigelseskompensation

Münchens Tekniske Universitets Institut for Omformningsteknik og Støberiteknologi har som interesseområde at kunne analysere komponentgeometrier og på baggrund heraf automatisk at kompensere for dimensionsafvigelser, hvilket er at forstå som en geometrikontrollør i den løbende produktion af AM-fremstillede komponenter. Denne procedure er allerede blevet anvendt med succes inden for formningsteknologi [8] og skal nu overføres til additiv fremstilling. Fremgangsmåden er vist skematisk i figur 8. Fra en ønsket geometri (mål), der i første omgang blev fremstillet ved 3-D printning, udledes en færdiggeometri. Den genererede emnegeometri (faktisk) sammenlignes med målet og evalueres. En kompensation kan beregnes ud fra afvigelsesinformationen, som i sidste ende fører til en opdateret produktionsgeometri, som i næste iteration kan printes målfast.

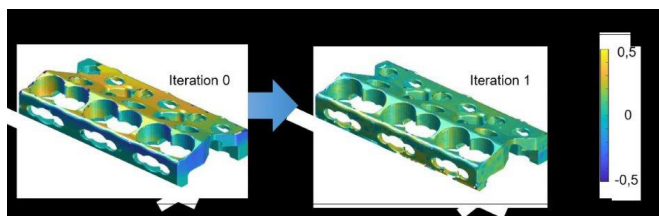
Den beregnede og respektive faktiske geometriske afvigelseskompensation beskrives i et netværk af parametriserede punkter (kontrolpunkter). På basis af målgeometrien oprettes automatisk et kontrolpunktsnetværk. Denne parametriserede beskrivelse af geometrien gør det muligt at anvende dimensionsafvigelser ved kontrolpunkterne på den aktuelle komponent direkte til kompensation på kontrolpunkterne på målgeometrien, og dermed opnå en opdateret produktionsgeometri. For at kunne anvende afvigelsesinformationen blev der i det første trin

valgt en lineær tilgang, og produktionsgeometrien ved kontrolpunkterne blev holdt i den modsatte retning af afvigelsens størrelse.



Figur 8: Oversigt over proceduren for kompensation for geometriske afvigelser.

Forsøgene med tilsætningsprocessen af bindemidlet blev udført i samarbejde med Fraunhofer IGC, som har et industrielt 3D-printsystem VX 1000 fra Voxeljet. En abstrakt vandkappe-geometri blev additivt printet med et uorganisk bindemiddelsystem og digitaliseret ved hjælp af et optisk målesystem. Produktionsgeometrien blev automatisk justeret baseret på disse data og udskrevet igen.



Figur 9: Afvigelsesanalyse af den oprindelige kerne (Iteration 0) og den kompenserede kerne (Iteration 1)

Figur 9 viser resultaterne af den geometriske afvigelseskompensation for en eksemplarisk komponent afbildet i falske farver. Iteration 0 angiver den oprindelige afvigelsestilstand for komponenten før afvigelseskompensation. Iteration 1 viser afvigelserne efter én iteration af den geometriske kompensation. Den geometriske kompensation blev udført på basis af diskrete geometridata (STL-format). Det fremgår tydeligt (mere grøn farve, red.), at afvigelserne blev væsentligt reduceret i hele komponenten.

Forventninger

Det er kendetegnet for additiv fremstillet serieproduktion, at dimensionsafvigelser er afhængige af komponenternes position på fremstillingsplatformen. Det betyder, at flere komponenter fremstillet på samme tid har forskellig dimensionsnøjagtighed afhængig af deres placering. På baggrund af de her viste forsøg og de positive resultater, skal der udføres en større forsøgsrække, hvor flere kerner på en fremstillingsplatform uafhængigt af hinanden dimensionskompenseres under den løbende produktion. Dette er allerede gennemført med succes i [9] for komponenter i SLS-processen og overføres nu til støbekerner. Derudover skal funktionaliteten yderligere testes, undersøges og optimeres til forskellige geometrier, for eksempel for at reagere forskelligt på særlige geometriske træk. Derudover skal algoritmen udvides og ikke kun én, men

alle iterationer, der allerede er kørt igennem, skal tages i betragtning. I analogi med den klassiske PID-regulator svarer dette til en I- og en D-komponent og øger robustheden af den databaserede afvigelseskompensation.

Yderligere information

wolfram.volk@utg.de
philipp.lechner@utg.de
christoph.hartmann@utg.de
patricia.erhard@igcv.fraunhofer.de
www.utg.de www.igcv.fraunhofer.de

Kassel Universitets Institut for Produktionsteknik og Logistik, Fagområde for Støberiteknologi

Kunstig intelligensbaseret automatiseret optisk inspektion: Brugsmønster ultra tyndvægget trykstøbning.

Motivering

Kravene til produkternes præcision og kvalitet er konstant stigende på tværs af alle brancher. Derfor er efterspørgslen efter økonomisk kvalitetssikring også stigende, hvilket dog kan være i modsætning til krav som lavere cyklostider, stadig flere individuelle produkter og hurtige produktskift. På grund af sin fleksibilitet bruges manuel optisk kvalitetskontrol ofte til små serier [10], [11], men metoden har processpecifikke svagheder med hensyn til nøjagtighed og reproducerbarhed af resultaterne. Miljøpåvirkninger, motivation hos og kvalifikation af medarbejderen har en væsentlig indflydelse på resultatet. Den logiske videreudvikling er automatiserede systematiske processer kombineret med billedbehandlingsmetoder til at kunne opdage og vurdere overflade fejl. Denne tilgang er praktisk anvendelig ved visse applikationer, men den har sine begrænsninger ved processer med en høj fejlvariation, f.eks. ved støbning af jern og metaller. Fejl såsom revner, blæsehuller, overflade fejl eller indeslutninger i støbte komponenter kan antage forskellige former og karakteristika. Konsekvenserne er uopdagede fejl eller ikke-eksisterende fejl, såkaldte pseudofejl. I begge tilfælde falder effektiviteten og dermed økonomien i produktionen. Ved at bruge maskinlæringsområdets kunstig intelligens (AI) teknikker til billedevaluering, kan det systematiske system erstattes af et konstant selvlærende system og dermed øge produktiviteten.

Case story "ultra tyndvægget trykstøbning"

I projektet "ultra tyndvægget trykstøbning" blev der ved hjælp af koldkammer trykstøbning fremstillet forsøgs-komponenter med store overflader og med vægtykkelser ned til 0,5 mm i ribbespidserne. Den gennemsnitlige vægtykkelse var 1 mm. De fremstillede komponenter bruges til at karakterisere de mekaniske materialeegenskaber og til at undersøge udfordringer i støbeprocessen med godstykkelse under 1 mm. Med de opnåede materialeegenskaber blev der fremstillet et stolarm-læn, som i dag fremstilles af et polyamid med 30 % glasfiberindhold. Stolarm-lænet blev udviklet med strukturelle mekaniske

justeringer som en letvægtskomponent i trykstøbt aluminium og med en vægtreduktion på cirka 9 %.

Optisk inspektion

Ved fremstillingsprocessen af forsøgskomponenterne opstod der på grund af de små vægtykkelser optisk synlige overfladedefekter såsom koldløb, revner, ufuldstændig formfyldning og koldløbninger. Disse defekttyper kan analyseres ved hjælp af optisk inspektion [12]. Til den optiske analyse af overfladebeskaffenhed blev defekterne karakteriseret og klassificeret samt opdelt i forskellige sværhedsgrader. Billeder af komponenterne blev optaget ved hjælp af et kamerasystem. Herved kan de områder, hvor defekterne befinder sig, allerede bringes i fokus, når billederne tages.

Til billedoptagelsen anvendtes gods fra opstarter og støbte dele fra forskellige forsøgsserier, hvilket giver dette støbegods, som ellers ikke er videre anvendeligt, en ekstra værdi. Udover de udfordringer, som varierende lysforhold og optagelsesvinkler medfører, var der også udfordringer med refleksioner fra forskellige formoverflader, proces- og temperaturrelaterede farveforskelle fra flowlinjer og gennemtrængende konturer samt farveforskelle fra slipmidlets forskellige spraypåføringsmetoder.

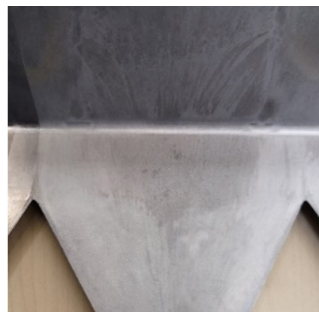
Farveforskel sprayforsøg



Gennemtrykning fra konturer



Farveforskel flowlinjer



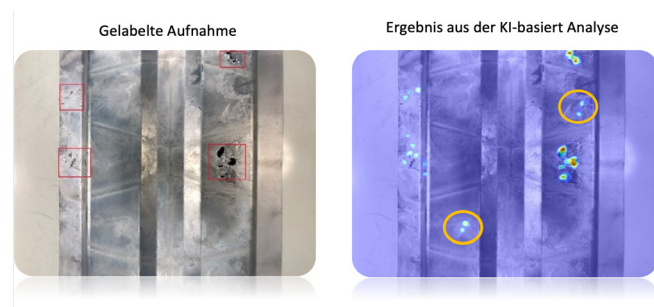
Refleksion fra værktøjsoverflader



Figur 10: Eksempler på proces- og temperaturrelaterede udfordringer ved registrering af komponenterne.

De optagne billeder danner grundlag for AI-systemet. Fejlene på billederne er mærket (markeret) og klassificeret. Nogle af billederne blev brugt til at træne AI, andre til at validere. De neurale netværk blev derefter trænet. Baseret på de mærkede billeder forstår modellen sammenhængen og karakteristika ved sådanne defekter og

kan også anvende dem på tidligere usete billeder. Fejlklasserne observeret på de støbte komponenter er meget forskellige og komplekse, og overlapper hinanden, hvorfor AI-systemet ved hjælp af passende forbehandling på de støbte dele blev optimeret. Som et resultat er modellen til sidst i stand til at opdage selv lidt fra hinanden afvigende defekter. AI er i stand til at lokalisere og visualisere ikke kun store defekter, men også de mindste defekter, som det menneskelige øje ellers ikke kunne opfatte. Dette er især vigtigt for defekter, hvis påvisning er påkrævet af kvalitetskrav, men som ikke kan opdaget med det menneskelige øje eller hurtigt overses, se. figur 11



Figur 11: Venstre: Mærket billede med tydelige defekter. Til højre: Resultat fra den AI-baserede analyse. Sandsynligheden for en defekt vises ved hjælp af farvegraderinger. To defekter blev ikke bemærket under mærkningen.

Sammenfatning

Den anvendte case story og udvælgelsen af komponenterne repræsenterer i mange henseender ekstreme tilfælde. I produktionen er fejlene ofte mindre, og overfladerne er mere homogene og har færre farveforskelle. Belysningen af komponenterne og de ydre lysforhold er konstante under industrielle processer, hvilket fører til en højere billeddatakvalitet og efterfølgende til pålidelige resultater i analysen. Målet om at bevise gennemførlighed og udvikle det grundlæggende i AI-modellerne blev nået. I efterfølgende trin skal forskellige emner fra produktionen bruges til at teste geometri-uafhængig overførbarehed.

Yderligere information

fehlbier@uni-kassel.de
sekretariat-gtk@uni-kassel.de
adam.fros@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/go/gtk

Sammenfatning og forventninger

I to artikler fra AKAGuss blev der fremlagt grundlæggende metoder og algoritmer til dataindsamling og -behandling til anvendelse i støberibranchen. I denne sidste del blev mulighederne for databaseret procesoptimering og overvågning beskrevet ved hjælp af konkrete proceseksempler. Denne artikel kan danne udgangspunkt for fremtidige industri- og forskningsaktiviteter, som AKAGuss institutter gerne vil igangsætte sammen med interesserede støberier og virksomheder for dermed at kunne opnå en efterfølgende værdiskabelse. Den brede vifte af emner der er beskrevet her, bør repræsentere kontaktpunkter

for dette fælles arbejde med henblik på at etablere resultater af aktuel forskning i den støberirelaterede industri.

Artiklerne er bragt i GIESSEREI 06-07/2021 og oversat for Støberiet af redaktionen.

Litteraturoversigt

- [1] Tonn B, Lacaze J, Duwe S (2018) Degenerated Graphite Growth in Ductile Iron. MATER SCI FORUM 925:62–69. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.925.62
- [2] Ertel W (2016) Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung, 4. Aufl. Computational Intelligence. Springer Vieweg, Wiesbaden
- [3] Fahrmeir L, Kneib T, Lang S, Marx B (2013) Regression. Models, methods and applications. Springer, Berlin, Heidelberg
- [4] G. L. L. Di Muoio and N. S. S. Tiedje, "Achieving Control of Coating Process in your Foundry," Arch. Foundry Eng., vol. 15, no. 4, pp. 110–114, 2015, doi: 10.1515/afe-2015-0089.
- [5] G. L. Di Muoio, "Drying of water based foundry coatings: Innovative test, process design and optimization methods," DTU Mechanical Engineering, 2015.
- [6] G. L. Di Muoio and N. S. Tiedje, "When dry is dry? Process design rules, simulations and industrial cases on the drying of water based foundry coatings," Int. Foundry Res., no. 4, 2015.
- [7] G. L. Di Muoio, A. Della Rocca, and N. S. Tiedje, "CFD Study for the Optimization of the Drying Process of Foundry Moulds used in the Production of Wind Turbine Components," Int. J. Eng. Res. Appl., vol. 5, no. 2, pp. 96–101, Feb. 2015.
- [8] Hartmann, C.; Eder, M.; Opritescu, D.; Volk, W. Process-integrated Compensation of Geometrical Deviations for Bulk Forming. Procedia Engineering 2017, 207, 466 – 471. International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17-22 September 2017, Cambridge, United Kingdom, doi:10.1016/j.proeng.2017.10.806
- [9] Hartmann, C.; Lechner, P.; Himmel, B.; Krieger, Y.; Lueth, T.C.; Volk, W. Compensation for Geometrical Deviations in Additive Manufacturing. Technologies 2019, 7, 83. <https://doi.org/10.3390/technologies7040083>
- [10] Battaglia, E.; Bonollo, F., et al.: Correlation between process, microstructure and properties in high pressure die casting aluminium-silicon alloys, In: Advances in Materials and Processing Technologies, 3, 1, 2017, S. 111–124
- [11] Rahmalina, D.; Sukma, H., et al.: Effect of the Processing Parameters on the Shrinkage Defect Using A High-Pressure Die-Casting Process, 19th International Union of Materials Research Societies, Bali, 2018
- [12] Aneiba, A.; Brown, S.: Smart Die Casting: A New Approach. In: Neighbour, G.; Aftelak, A., Innovation in manufacturing through digital technologies and applications: Thoughts and Reflections on Industry 4.0., Belmont Press, Birmingham, 2018, 978-1-5272-2983-9, S. 80–90