

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství – děkanát

Technická 2896/2

616 69 Brno

V Brně dne, 8.7.2016

Věc: Oponentský posudek k disertační práci Ing. Petra Hlavsy

Č. J.: 135/13903/16 Vrb

Téma práce: Interakce jádro-tavenina při odlévání hlav válců z Al slitin do kovových forem

Příložená disertační práce obsahuje 120 stran textu, 107 obr., 24 tabulek, 39 literárních odkazů a autor práce uvádí 4 autorské publikace.

Autor uvádí, že hlavním cílem práce je teoretický popis problému s nalepováním zbytků termicky ovlivněného křemenného písku z pojivového systému Cold Box po odjádrování na povrch sacího a výfukového kanálu odlitku hlavy válce. Cílem práce je zmapovat kombinace faktorů, které tuto vadu způsobují a bude-li to možné nalézt řešení buď ve stádiu příčiny nebo důsledku vzniku tohoto problému.

Dalším cílem práce je zkoumání povrchové aktivity křemenného písku Šajdíkovy Humence ŠH 32, který se používá pro pojivový systém Cold Box ve slévárnách slitin Al odlévaných gravitačně do kovových forem. Cílem je dosažení vyšších pevnostních vlastností a tím získání možnosti např. snížení dávkování pojivového systému, snížení vývinu plynů a kondenzátů, zvýšení tekutosti směsi, tedy faktorů, které se mohou podílet na vzniku problému s nalepováním zrn písku na povrch odlitků.

Současný stav řešené problematiky

V oblasti současného stavu řešené problematiky se autor věnuje nejprve křemennému ostřivu, jeho vlastnostem, rozmezí doporučených kvalitativních parametrů a faktorům, které ovlivňují jeho pevnostní vlastnosti a mají vliv na jeho povrchovou kvalitu.

Jedna celá kapitola je věnována vlastnostem křemennému písku Šajdíkovy Humence, způsobu geneze, popis technologického procesu od těžby až po vodní úpravu. Dále je v práci uvedena morfologie, spékavost a chemické složení ostřiva. V práci je uvedeno, že pískovna v roce 2011 investovala do nové mokré úpravní s dvoustupňovou atriční jednotkou (hydraulický otěr). Je zde vysvětlen princip tohoto hydraulického otěru.

Dále se práce věnuje charakteristice a popisu organického pojivového systému Cold Box určeného pro výrobu jader. V další části autor popisuje princip, výhody a hodnocení

technologie odlévání ROTACAST, kde se vada s nalepováním písku vyskytuje a uvádí zde rozdíly od odlévání na běžně používaných flexi linkách. Dále se práce věnuje stavu poznání důsledků vzájemné interakce mezi odlévaným kovem (slitina Al) a povrchem pískového jádra, okolnostem, které mají vliv na povrchovou jakost odlitků a iniciací povrchových vad - penetrací kovu do povrchu jader. Autor se dále věnuje detailněji podmínkám a parametrům, které mají vliv na vznik mechanické penetrace. Uvádí se zde, že největší vliv působící proti pronikání taveniny mezi zrna pískového jádra má kapilární tlak. Autor dále nově uvádí klasifikaci a rozdělení mechanických penetrací, které se opakovaně objevují u odlitků hlav válců ze slitin Al. Z uvedeného vyplývá, že výskyt mechanické penetrace je kromě jiného ovlivněn teplotou lité, měrnou hmotností taveniny, rychlostí plnění formy, licí výškou, dynamickou viskozitou taveniny, velikostí středního zrna ostřiva, prodyšností formy, schopností tepelné akumulace formy a jádra. V další části popisuje autor metodu Cogas pro určování množství plynů a kondenzátů uvolňujících se z cold-boxového jádra během odlévání.

Na závěr představuje a vysvětluje metodiku řešení daného problému DMAIC, nástroj pro zvyšování kvality a zavádění nových změn ve výrobním procesu, který využívá metodiku plánování experimentu DOE v programu Minitab 17 (statistické vyhodnocení a analýza dat) a diagram příčin a následků (Ishikawa diagram). Všechny tyto metodiky jsou součástí strategie řízení metodou Six Sigma, která si klade za cíl identifikovat a odstranit příčiny defektů a chyb v procesech výroby a obchodu.

K této části práce mám následující dotazy:

- Můžete definovat teoretický rozdíl mezi pojmem nalepený písek – penetrace – připečenina?
- Můžete pro představu více detailně uvést pyrolýzní látky, které potenciálně mohou vznikat z pojivového systému Cold Box při interakci s taveninou u slitin Al?
- Můžete popsat metodiku stanovení zbytkových nečistot v odlitku? Uvádíte pouze mezní hodnotu do 100 mg částic < 2x1mm

Experimentální část

Pro sací a výfukové kanály, kde se vyskytuje problém s nalepováním písku, se používají jemná ostřiva z důvodu dosažení požadované drsnosti povrchu odlitků. Pro výrobu těchto typů jader se v současné době sériově používá pojivový systém Cold Box.

V první části experimentu jsou měřena a analyzována data při nastavení procesu před změnou parametrů – současný stav. Při experimentech bylo pracováno s ostřivem Šajdíkovy Humence ŠH 35, velikost středního zrna $D_{50} = 0,21\text{mm}$. Byla provedena detailní síťová analýza ostřiva. U jádrových směsí vyrobených z technologie Cold Box pro sací a výfukové kanály byly hodnoceny jejich technologické vlastnosti. Dále jsou uvedeny vlastnosti slitiny AlSi10Mg(Cu), která se pro tento typ hlavy válců používá. Proces odlévání (vliv tekutého kovu) je popsán prostřednictvím měření teplot termokamerou v kritických částech sacích a výfukových jader, základové desky a bočních částí kokily při plnění a tuhnutí slitiny. Záznam je v časové závislosti zaznamenán na zapisovači (datalogger). Jsou popsány technologické parametry odlévání. Dále je popsán a detailně fotograficky dokumentován problém

s nalepováním zrn písku na povrch sacích a výfukových kanálů. Autor dále vysvětluje důvod použití metodiky DMAIC. Je zvolena metrika projektu jako procento výskytu nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech po odjádrování. Byl sestaven IPO diagram, který popisuje vstupy do procesu, řízení procesu a výstup z procesu – problém s nalepeným ostřivem.

Na základě analýzy současného stavu, byl sestaven Ishikawa diagram příčin a následků problému. Pomocí váhových faktorů 1-3 byly hodnoceny faktory, které mají vliv na vznik problému. Potenciální faktory kořenové příčiny problému s nejvyšším hodnocením úroveň 3, byly dále analyzovány a ověřovány experimentálním testováním, plánováním experimentu DOE a ověřováním hypotéz.

Nejprve byla ověřována hypotéza vlivu pyrolýzních organických zbytků z pojiva na nalepování zrn písku. Byla vyčtena domněnka o vlivu prodyšnosti na vývin organických kondenzátů na styčné ploše povrch odlitků/pískové jádro. Pro ověření této hypotézy bylo použito pozorování pomocí stereomikroskopu, EDS spektrometru a SEM mikroskopu. Bylo dosaženo velmi zajímavých výsledků o možné reakci taveniny a vznikajícího kondenzátu z plynu při rozkladu pojiva.

Pro další ověřování kořenových příčin problémů bylo využito plánování experimentu (DOE) v programu Minitab 17. Posuzoval se vliv teploty taveniny, kontakt sacích a výfukových jader se základní deskou, chlazení desky a vliv sítěk v kokile. Experiment měl 4 faktory ve dvou úrovních. Graf polo-normální a normální pravděpodobnosti ukazuje na významný účinek faktoru A tj. teplota taveniny a faktoru BA tj. kontakt sacích a výfukových jader se základní deskou (kalotami) v kombinaci s teplotou lití. Použitím plánování experimentu bylo zjištěno, že nejsou-li sací a výfuková jádra během odlévání v kontaktu se základní deskou (kalotou) nemusí dojít ke vzniku nalepeného písku. V praxi to znamená, že odlitky získané tímto způsobem mají po odlití spalovací část (vyústění sacích a výfukových kanálů) uzavřenou. Autor zde vytvořil hypotézu, zda nedojde ke stejnému efektu tím, že bude odlitek vyroben sériovým způsobem (kaloty v kontaktu se sacími a výfukovými jádry), teprve po vychladnutí budou kanály ze strany spalovacího prostoru před odjádrováním uměle uzavřeny. Následné odjádrování ukázalo, že kanály jsou čisté bez zrn písku. Myslím si, že ověření této hypotézy nebylo zcela správně provedeno, experiment měl být proveden způsobem odpovídajícím výsledkům DOE, tj. měl být proveden praktický experiment s X kusy odlitků, vyrobených tak, aby sací a výfuková jádra nebyla při odlévání v kontaktu se základní deskou (kalotou), po vychladnutí odlitku měly být otvory odvrtny a srovnán povrch v kanálových prostorech se sériově odlévanými kusy, teprve poté odjádrovány. Prosím autora o komentář a detailnější vysvětlení postupu při ověřování této hypotézy.

Dále byl laboratorním experimentem testován samostatný vliv jiného pojivového systému Cold Box s nižší tvorbou plynů a kondenzátů při stejném dávkování složek systému. Analýzou COGAS byl potvrzen nižší časový vývin plynů během tuhnutí i celkové nižší množství kondenzátu v měřeném vzorku ve srovnání s používaným systémem. Výsledky ukazují, že pojivový systém Cold Box s nižším množstvím plynů a kondenzátů nemá jako samostatný faktor vliv na pozitivní řešení problému s nalepováním zrn písku. Pravděpodobně

bude mít ale vliv v kombinaci s jiným faktorem, jak naznačuje analýza styčné plochy povrch odlitku/povrch pyrolýzně degradovaného zrna ostřiva viz výše.

Byly stanoveny ještě další hypotézy, jako např. jestli se v případě nalepeného ostřiva nejedná o mechanickou penetraci způsobenou významným faktorem a to technologií odlévání Rotacast, kdy může docházet k mechanickému vtlačení taveniny do pórů mezi zrna ostřiva. Tuto hypotézu v současné době nelze z důvodů současného uspořádání technologie Rotacast provést.

Ve slévárně byly realizovány testy, které se zaměřily na oddělení styčné plochy povrch odlitku/povrch pískového jádra. Nejprve byl úspěšně odzkoušen mastek v podobě prášku (Talkum), aplikace štětcem na povrch jader sacích a výfukových kanálů. Po odlití byl povrch odlitků v kanálovém prostoru hladký bez nalepených zrn písku. Problém byl s aplikací prášku a poměrně vysoké investice do fluidizační vany. Slévárna tento způsob řešení důsledku problému nezavedla.

Následně byl aplikován slévárenský tepelně-pružný nátěr na bázi alumino-silikátů s podíly keramiky. Nátěr byl naředěn vodou dle doporučení výrobce a aplikován stříkácí pistolí, pouze na funkční části sacích a výfukových jader. Vyschnutí nátěru před založením do kovových forem na vzduchu min. 24 hod. Po odlití byl povrch odlitků v kanálovém prostoru hladký bez nalepených zrn písku. Protože slévárna disponuje pracovištěm na stříkání jader, nebyla nutná žádná nová investice. Aplikací nátěru ve srovnání s čištěním odlitků kartáčováním se na výrobní kontrole zvedla produktivita téměř o 100% při minimálním zvýšení nákladů na jedno jádro (0,23Kč/kus). Autor uvádí, že slévárna toto opatření zavedla do sériové výroby a nahradila jím dosavadní čištění odlitků kartáčováním.

Dalším cílem práce, jak již bylo uvedeno výše, bylo zkoumání povrchové aktivity křemenného písku Šajdíkovy Humence ŠH 32 s možností ovlivnění pevnostních vlastností, a tím získání možnosti např. snížení dávkování pojivového systému, snížení vývinu plynů a kondenzátů, zvýšení tekutosti směsi, tedy faktorů, které se mohou podílet na vzniku problému s nalepováním zrn písku na povrch odlitků. Ve spolupráci autora s pískovnou byla provedena srovnávací síťová analýza křemenného písku Šajdíkovy Humence ŠH32 před a po hydraulickém otěru, oba písky byly srovnány s křemenným pískem (německý standard) Haltern H31. Je nutné brát v úvahu, že Haltern H31 má nižší střední zrno ($D_{50} = 0,33$ mm), lze očekávat vyšší pevnosti a vyšší jemné podíly, což se v pevnostní analýze potvrdilo. Srovnáním pevnostní charakteristiky písku Šajdíkovy Humence ŠH32 před a po hydraulickém otěru autor konstatuje velmi povzbudivý nárůst pevností po hydraulickém otěru a to až na téměř dvojnásobek pevností po 24 hod. vytvrzování ve srovnání s pískem bez této úpravy.

Poznámky k této části:

- Prosím vždy je nutné uvádět dané laboratorní podmínky, viz str. 77.

K této části práce mám následující dotazy:

- Proč bylo pracováno pouze s křemenným pískem Šajdíkovy Humence? Jaké výsledky ev. problémy lze očekávat při použití jiných křemenných písků?

- Používá se slitina AlSi10Mg(Cu) kromě odlévání technologií ROTACAST také pro odlévání na flexi linkách? Pokud ano, jaké byly povrchy ve vztahu k výskytu řešené vady?

Závěrečné hodnocení práce

Velká devize práce je v tom, že byla řešena ve spolupráci se slévárnou odlitků hlav válců pro osobní automobily. Jedná se o konkrétní problém na sériově vyráběných odlitcích, které jsou po opracování montovány do automobilů. Popsání a hledání řešení daného problému jak v oblasti příčiny, tak důsledku slibuje pro výrobce nemalé ekonomické úspory, především ale zvýšení kvality a produktivity, jako faktorů, které se v dnešní době ve spojitosti s úspěšným podnikáním nejvíce skloňují.

Řešený problém s nalepováním zrn tepelně ovlivněného křemenného písku na povrch odlitků hlav válců odlévaným gravitačním litím metodou Rotacast je pro tyto slévárny a jejich zákazníky velmi aktuálním tématem. Zákazníci sléváren hlav válců vyžadují, aby prostory sacích a výfukových kanálů obsahovali minimální množství těchto nečistot, tato hodnota je přesně kvantifikována. Tyto slévárny v současné době nejsou schopny dosáhnout požadované kvality bez zavedení víceprací, které zatěžují slévárny jak po stránce ekonomické, tak především v oblasti produktivity výrobní kontroly odlitků. Jedná se tedy o významný problém.

Je potřeba si uvědomit, že slévárna tohoto typu současně řeší spoustu jiných kvalitativních problémů, optimalizuje proces, hledá úspory, neustále se v krátkých časových horizontech mění nastavení parametrů výroby. Realizace experimentů je v těchto podmínkách limitována jednak organizačně náročným výrobním procesem slévárny (použitých technologií výroby jader a způsobu odlévání odlitků), možnostmi vstupů do výrobního procesu, tak i vybavením laboratoří, které může řešitel využít.

Autor při hledání řešení problému postupoval předem promyšleným, systematickým způsobem. Velmi oceňuji, že pro hledání možných příčin vzniku problému byly využity moderní nástroje řízení a zvyšování kvality procesu. V této práci konkrétně metoda Six Sigma, která používá metodiku řešení daného problému DMAIC s využitím např. Ishikawa diagramu a metod plánování experimentu DOE. Díky metodickému postupu se podařilo nalézt funkční nástroj pro řešení daného problému, což považuji za jeden z vědeckých přínosů této práce. Na základě analýzy procesu bylo stanoveno několik významných potenciálních faktorů, které mohou mít vliv na kořenovou příčinu problému. Byla provedena řada experimentálních testů, vyslovení a ověření hypotéz. Bylo zjištěno, že tyto faktory neovlivňují vznik problému izolovaně, ale pravděpodobně v kombinaci více faktorů, které by potenciální navazující řešitelé tohoto problému mohli dále detailněji rozvést. Práce předkládá funkční návod, jak dále postupovat při hledání dalších optimálnějších řešení daného problému.

Z vědeckého hlediska je také přínosná a velmi zajímavá analýza povrchu odlitků s nalepeným ostřivem, doložená bohatou fotodokumentací. Velmi zajímavá na základě indicií (zbarvení povrchu, přítomnost organického C, pórovitost mezi dendrity a jejich zakulacený tvar), je zde hypotéza o možné reakci taveniny a vznikajícího kondenzátu z plynu při rozkladu

pojiva. Další vědecký přínos má, jak sám autor uvádí, klasifikace mechanické penetrace zjištěná na povrchu odlitku hlavy válce.

Technický přínos práce pro slévárnu je zavedení aplikace nátěru na jádra sacích a výfukových kanálů, což umožnilo ve srovnání s čištěním odlitků kartáčováním zvýšit produktivitu na výrobní kontrole téměř o 100% při minimálním zvýšení nákladů na jedno jádro (0,23Kč/kus).

Celkově jsem s předloženou prací velmi spokojen, splnila stanovené cíle, přinesla řadu vědeckých poznatků, práce obsahuje bohatý experimentální materiál. Práce je zpracována systematicky na velmi dobré formální i jazykové úrovni.

Pan Ing. Petr Hlavsa prokázal, že dovede řešit technické problémy na vysoké odborné a vědecké úrovni, proto doporučuji práci k obhajobě a po její úspěšném obhájení udělení akademického titulu Ph.D.

Ing. Michal Tegel, Ph.D.

Příloha 1. Formální nedostatky disertační práce Ing. Petra Hlavsy

- | | |
|---------|--|
| Str. 55 | obr. 38: technologie používaná v současné době |
| Str. 59 | drsnost do Rz=70 μ m |
| Str. 62 | Tlaky na levé straně rovnice |
| Str. 62 | Odpor proti pronikání taveniny do formy |
| Str. 66 | obr. 51 a 52; str. 98, obr.98 a 99 – chybí odkaz na propojení s textem |