

Recenzované výzkumné články

Vliv teploty a koncentrace polymerních roztoků na intenzitu chlazení při tepelném zpracování

Influence of Temperature and Concentration of Polymer Quenchants on Cooling Intensity at Heat Treatment

Bc. Veronika Hřibová¹, Ing. Jan Komínek¹, prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

Tepelné zpracování zanořením ohřátého výrobku do chladiva je běžná, od pradávna využívaná technologie. Intenzita chlazení je zde primárně určena volbou chladicí kapaliny. Dalšími faktory, které je možné ovlivnit, jsou teplota kapaliny a případně její vynucené proudění kolem ochlazovaného povrchu. Obecně můžeme uvažovat chladicí prostředky od použití vody jako velmi intenzivního chladiva, přes škálu minerálních a podobných olejů, po použití roztavených solí, které mohou mít podstatně nižší intenzitu přenosu tepla. Další, nyní častěji využívanou variantou je chlazení polymerními roztoky s vodou. V běžných aplikacích bývají užívány koncentrace mezi 5 a 30 % polymeru ve vodě, které umožňují řízení intenzity chlazení v široké škále pokrývající oblast mezi použitím čisté vody a oleje. Tento článek je věnován vlivu teploty a koncentrace polymerních roztoků na bázi PAG (polyalkylenglykol) na intenzitu chlazení. Experimentálně byly studovány i vyšší koncentrace polymeru a vliv teploty chladiva na průběh ochlazovacích křivek. Využití vyšších koncentrací a proměnných teplot chladiva přineslo některé překvapivé výsledky s potenciálem pro jejich technické využití.

Klíčová slova: tepelné zpracování; kalicí media; chlazení zanořováním; polymerické roztoky

The success of heat treatment of any metal alloy and achievement of the required properties is dependent on the entire process. Quenching is an integral part of heat treatment. Selection of a proper quenchant, its temperature and possibly also concentration, are the key factors. If an alloy is quenched too quickly, distortion increases. If it is quenched too slowly, excessive heterogeneous precipitation occurs. Hot water is often selected as an alternative to cold water quenching for distortion reduction. Another, generally better alternative, is the use of polymer quenchants. Commonly a PAG (polyalkylene glycol) co-polymer is used. Concentrations between 5 % and 30 % provide quenching power ranging from that similar to fast quenching oils to that greater than water. This article contains a study of even higher concentrations, which appear to have very different cooling characteristics. The experiments proved a very strong dependence of cooling rate on concentration. While the generally-used concentrations under 50 % cause an intensive cooling almost immediately after immersion, with higher concentrations the cooling rate remains to be approx. 400 Wm⁻²K⁻¹ and an abrupt increase of the cooling rate occurs at a lower surface temperature. When using the same initial temperature of the coolant (e.g. 60 °C) and different concentrations, a gradual change of the surface temperature, when this effect appears, can be observed. It is very important to determine the accuracy, with which it is possible to maintain the coolant temperature within the certain range. A large increase of the coolant temperature during the quenching process may cause a significant change of the assumed cooling rate.

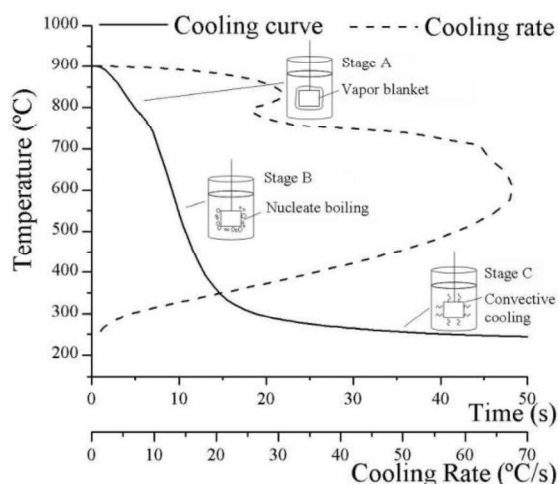
Key words: heat treatment; immersion cooling; polymer quenchants

Tepelné zpracování má zásadní vliv na konečné materiálové vlastnosti kovů. Vhodné chlazení umožňuje ovlivňovat tvrdost a houževnatost, ale též umožňuje snižovat úroveň deformací a zbytkových napětí, která vznikají během tepelného zpracování nejvíce právě

při chlazení. Klíčem ke správnému průběhu chlazení zanořováním tepelně zpracovávaných dílů je výběr správného chladiva pro danou aplikaci, jeho teploty, koncentrace a dalších podmínek, zejména rychlosti, charakteru a směru proudění.

1. Fáze přenosu tepla při chlazení zanořováním do vody

Během chlazení z vysoké teploty dochází ke třem fázím s rozdílnou intenzitou přenosu tepla. První z nich je fáze blánového varu (fáze A). Po zanoření kovového dílu dochází k vytvoření tenké vrstvy páry okolo chlazeného povrchu, která brání přímému kontaktu s chladivem. Přenos tepla přes tuto vrstvu je relativně slabý, a kov se proto v této fázi ochlazuje pomalu. Chlazení ve fázi blánového varu přetrvává, dokud je povrchová teplota dostatečná k udržení parní vrstvy. Následuje fáze bublinového varu (fáze B), při níž je parní vrstva na povrchu chlazeného dílu protržena. Tomu odpovídá prudký nárůst intenzity přenosu tepla způsobený přímým kontaktem vody s povrchem tělesa. Kov je zde stále velice horký a voda silně vře. Vysoká intenzita bublinového varu je pak důvodem dalšího výrazného zintenzivnění přenosu tepla. Fáze volné konvekce (fáze C) začíná, když teplota kovu klesne pod teplotu varu daného chladiva. Var ustává a povrch kovu je dále chlazen už jen vedením a prouděním. Intenzita chlazení během fáze volné konvekce je nejvíce ovlivněna viskozitou, měrným teplem a tepelnou vodivostí daného chladiva, přičemž intenzita chlazení klesá se zvyšující se viskozitou. Tato fáze je většinou pro tepelné zpracování nezajímavá z pohledu struktury, má ale relativně velký vliv na utváření vlastní transformační napjatosti, protože zpravidla se teplotní interval konvekčního chlazení částečně nebo úplně překrývá s intervalem Ms a Mf. Jednotlivé fáze chlazení jsou zobrazeny na obr. 1.



Obr. 1 Tři fáze přenosu tepla [1]
Fig. 1 Three stages of heat removal [1]

2. Chladiva

2.1 Výběr chladiva

Běžně užívanými kapalnými chladivy jsou voda, solné roztoky, minerální a rostlinné oleje a polymerní roztoky [2]. Při výběru správného chladiva existuje mimo základního požadavku na rychlost ochlazování i mnoho vnějších faktorů, jako je jeho cena, dostupnost, údržba i ekologická likvidace.

Nejsnadněji dostupným chladivem je voda. Zjednodušeně řečeno, celková průměrná ochlazovací účinnost vody je v první řadě závislá na teplotě a do značné míry na míchání vodní lázně. S rostoucí teplotou vody se její ochlazovací účinnost výrazně snižuje a parní vrstva, která se vytvoří na povrchu kovového dílu během fáze blánového varu, je stabilnější. Tato vrstva také vydrží po delší dobu [3].

Ochlazování kalených dílů ve vodě může být velmi nerovnoměrné, zejména díky tvarové složitosti součástí, popřípadě vsázek. Příčinou je různé dlouhé trvání období stabilního parního polštáře na různých tvarových detailech konkrétních dílů. Vzroste-li teplota vody na 50–60 °C, bývají výsledky kalení velmi nespolehlivé. Je to zapříčiněno stabilní, ale současně masivní parní vrstvou při chlazení a důsledkem jsou často proměnné tvrdosti, deformace a praskliny. Řešením jsou vhodné přísady, které mohou ochlazovací účinnost vodní lázně efektivně a příznivým směrem ovlivnit. Pro současné zintenzivnění a zrovnoměnění ochlazování se používají přísady rozpuštěných anorganických solí, pro současné zrovnoměnění ochlazování a snížení kalicí intenzity pak jsou to polymerní přísady.

2.2 Polymerní kalicí lázně

Polymerní roztoky zaznamenaly v posledních letech dramatický rozvoj. Jsou univerzálními a stabilními chladivy na bázi vody. Pro ponorné lázně se v dnešní době používají nejčastěji přísady na bázi PVP (polyvinylpyrolidon) nebo přísady na bázi PAG (polyalkylenglykol). PAG roztoky se používají i pro aplikace, kde je využito sprchy, tj. např. pro indukční povrchové kalení. Tyto roztoky umožňují dosahovat chladicích intenzit v široké škále. Dle zvolené koncentrace (v rozmezí asi 5–30 %) dosahuje intenzita chlazení při aplikaci PAG roztoků srovnatelné hodnoty při chlazení v oleji, až dokonce hodnoty intenzity chlazení přibližně srovnatelné a v některých případech (u velmi vysokých teplot) i vyšší než při chlazení vodou. PAG roztoky jsou užitečné pro mnoho operací tepelného zpracování. Jsou vhodné mimo zpracování oceli pro chlazení hliníku, kde mohou zmírnit deformační problémy zmíněné u chlazení vodou [4].

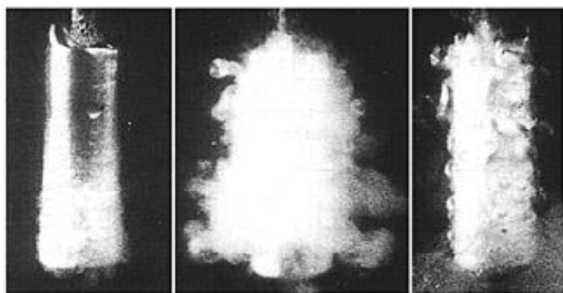
PAG roztoky jsou kompletně rozpustné ve vodě při pokojové teplotě. Molekuly těchto roztoků se ale vyznačují unikátní vlastností inverzní rozpustnosti ve vodě při vysokých teplotách. To znamená, že se zvyšující se teplotou dochází ke snížení rozpustnosti polymerních složek v PAG roztoku a dochází ke srážení. Při následném chladnutí této směsi se polymer opět rozpouští do roztoku. Teplota, při které se objevuje separace vody a polymeru, se pohybuje v rozpětí 65–85 °C dle daného roztoku [5], přičemž je ovlivňována stupněm pH, koncentrací polymeru v roztoku a přítomnými aditivními látkami. Se zvyšujícím se pH, stejně jako s rostoucím obsahem kontaminačních látek, se tato teplota snižuje. V praxi přítomnost polyalkylenglykolu modifikuje tři běžné výše popsané

fáze chlazení, a umožňuje tak větší flexibilitu v požadované intenzitě chlazení [3].

Fyzikální děje, které ovlivňují intenzitu chlazení, jsou u polymerních roztoků svou podstatou podobné jako běžně známé děje popisující chlazení ve vodě (kapitola 1 a obr. 1). V závislosti na koncentraci roztoku a jeho teplotě se ale může lišit průběh jednotlivých fází.

Z polymerního roztoku se po zanoření kovového dílu separuje polymerická složka a vytváří se povlak na chlazeném povrchu, který ovlivňuje míru přenosu tepla [6]. Na obr. 2 je zachyceno vytváření a postupné usazování vrstvy polymeru po zanoření zkušební vzorku. Tento povlak má gelový charakter a jeho tloušťka je závislá především na koncentraci, ale i na počáteční teplotě polymerního roztoku. Tloušťka této vrstvy pak výrazně ovlivňuje intenzitu přenosu tepla během celé fáze blánového varu. Obecně intenzita chlazení stoupá s klesající koncentrací polymeru, klesající počáteční teplotou polymerního roztoku a případně s rostoucí rychlostí vynuceného proudění. PAG roztoky v porovnání s vodou vytvářejí tento povlak mnohem stabilnější, což umožňuje rovnoměrný přenos tepla. Navíc dochází k porušení této vrstvy prakticky ve stejný čas podél celého chlazeného povrchu [3]. Díky tomu je omezen vznik prasklin a deformací.

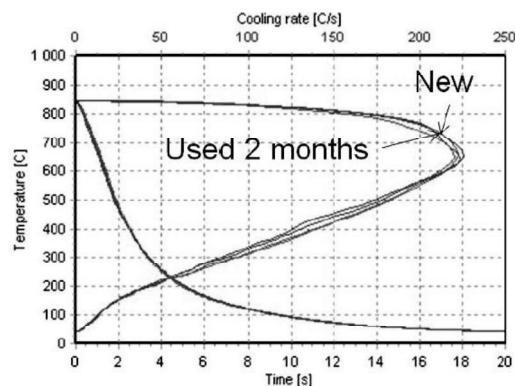
Jakmile pak povrchová teplota klesne pod 65 – 85 °C, vrstva polymeru se kompletně rozpouští zpět do roztoku, a vytváří tak znovu chladicí lázeň jednotné koncentrace. Kovové díly tak mají po vytažení z chladicí lázně téměř čistý povrch a dochází pouze k zanedbatelnému snížení koncentrace polymerního roztoku. Při vytažení dílu za vyšší teploty je rozpuštění nedokonalé, a dochází tak ke ztrátám účinných látek vlivem jejich ulpění na chlazeném povrchu [7].



Obr. 2 Vytváření a usazování vrstvy polymeru na povrchu kovového dílu [8]

Fig. 2 Creating and sedimentation of a polymer film around the surface of the metallic part [8]

PAG roztoky degradují velmi pomalu (viz obr. 3), tedy změna vlastností chladicího media je pozvolná a kontrola může být prováděna pouze při běžné údržbě. Navíc jsou tyto roztoky bezpečnější než oleje, nehoří a nekouří při zahřívání a nejsou toxické. PAG roztoky tedy přinášejí nižší ekologické i zdravotní riziko [4].



Obr. 3 Příklad pomalého stárnutí PAG roztoků [9]

Fig. 3 Slow degradation of PAG quenchants [9]

3. Experiment

Standardní zkoušky chladiv často probíhají podle normy ISO 9950 a v současnosti je používaným zařízením např. ivf Smart Quench™ systém. Vzorek je zhotoven z Inconelu o průměru 12,5 mm a délce 60 mm. Termočlánek je umístěn v geometrickém středu vzorku. Získané chladicí křivky tedy nepostihují povrch, ale pouze střed válce, což bylo pro účel níže popisovaného řešení nedostatečné.

3.1 Zkušební vzorek

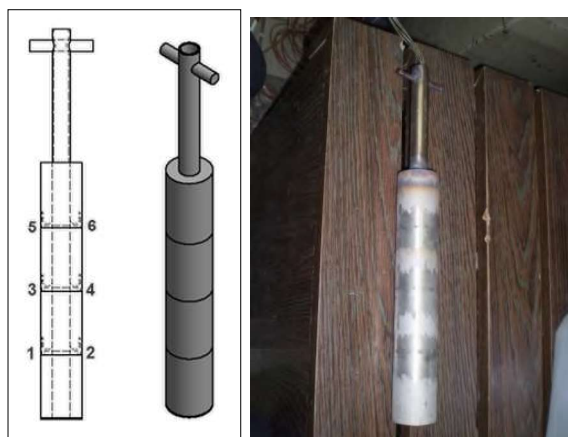
Testy chladivosti při zanořování se někdy získávají při užití malých vzorků, u kterých se měří průběh teploty v jeho středu. Posuzuje se pak pouze gradient poklesu teploty při zanoření. Ambice tohoto projektu byly poněkud vyšší a cílem bylo využít vzorek, který by měl větší rozměr a tvarem by se mohl více blížit ke skutečným chlazeným dílům. Hlavním cílem bylo pak získat nejen chladicí křivky, ale i průběhy součinitele přestupu tepla (HTC) v závislosti na povrchové teplotě. Navíc se zjišťovalo, jak se chlazení mění po výšce vzorku.

Pro experimenty byl vyroben vzorek z ocelové trubky materiálu DIN 1.4301. Byly vytvořeny 4 segmenty, do kterých byly zabudovány termočláanky umístěné 2 mm pod povrch. Tyto segmenty byly poté svařeny a termočláanky vyvedeny středem trubky. Svařený kus byl následně povrchově upraven broušením.



Obr. 4 Zabudování termočláanky do zkušební tělesa

Fig. 4 Incorporation of thermocouples into the test piece



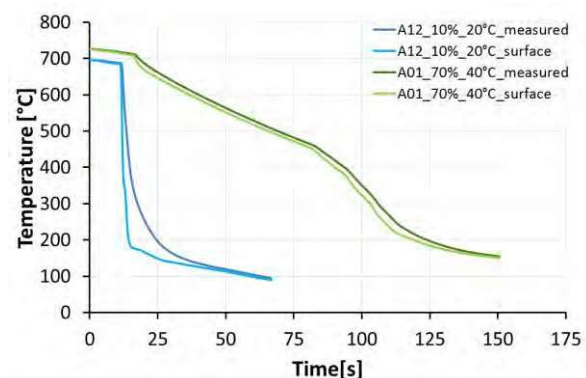
Obr. 5 Schéma s termočláňky a fotografie celé sestavy
Fig. 5 Design with thermocouples and photo of the whole set

3.2 Průběh experimentu

Experimentální vzorek byl ohřát v peci na teplotu 700 °C, přičemž horní uchopovací část byla odizolována a sahala ven z pece. Poté byl vzorek vytažen a kolmo ponořen do 10 litrů polymerního roztoku o příslušné koncentraci a teplotě. V popisovaném projektu se zkoumalo chlazení zanořováním zkušební tělesa do chladicí kapaliny na bázi PAG roztoků. Následně probíhalo měření přibližně po čtyři minuty. Hodnoty z termočláňků byly zaznamenány pomocí datalogeru a poté použity jako vstupy pro inverzní úlohy [10] k výpočtu tepelných toků, povrchových teplot a součinitelů přestupu tepla. Rozdíl mezi průběhy měřených teplot v hloubce termočláňku a vypočtených povrchových teplot lze pozorovat na obr. 6.

4. Výsledky experimentu

Bylo měřeno 14 kombinací parametrů (viz tab. 1). Dále uváděné výsledky ukazují jejich průměrné hodnoty na celém zkušebním tělese. Přesnější průběh na jediném termočláňku je možné vidět v kapitole 4.3, kde je v grafech znázorněna i opakovatelnost jednotlivých měření.



Obr. 6 Průběhy změřené a povrchové teploty v závislosti na použité koncentraci a teplotě chladiva

Fig. 6 Measured and surface temperature curves depending on concentration and temperature of the coolant

Graf na obr. 6 ukazuje naměřené a povrchové teploty v průběhu dvou experimentů A01 a A12. Tento graf vyjadřuje podstatu zkoumaného problému. Lze pozorovat velký rozdíl v intenzitě chlazení v závislosti na použité koncentraci kapaliny a její teplotě.

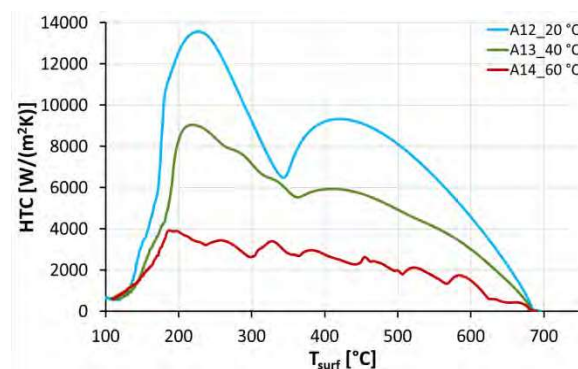
Tab. 1 Tabulka experimentů

Tab. 1 Table of experiments

Exp.	Koncentrace PAG roztoku	Teplota chladiva na zač. exp.	Teplota chladiva na konci exp.
	[%]	[°C]	[°C]
A01	70	40,5	52,1
A02	70	39,9	52,6
A03	70	20,6	34,4
A04	70	60,2	72,2
A05	70	21,1	35,2
A06	50	19,6	34,4
A07	50	40,5	54,1
A08	50	59,6	71,4
A09	30	20,1	34,6
A10	30	40,0	53,1
A11	30	60,1	72,0
A12	10	19,4	34,2
A13	10	40,2	53,8
A14	10	59,8	70,8

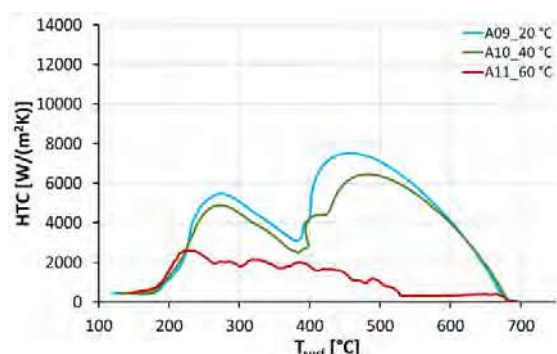
4.1 Závislosti intenzity chlazení na teplotě povrchu při různých počátečních teplotách chladiva

Na obr. 7 a 8 jsou zachyceny intenzity chlazení pro běžně užívané koncentrace polymerních roztoků. Na obr. 7 jsou vyhodnocena data z experimentů, při kterých byla jednotná koncentrace chladiva 10 % a jeho počáteční teplota byla 20, 40 a 60 °C. Na obr. 8 jsou pak data z experimentů pro shodné počáteční teploty chladiva, ale při koncentraci chladiva 30 %.



Obr. 7 Graf průměrného HTC na vzorku při různých teplotách chladiva a koncentraci 10 %

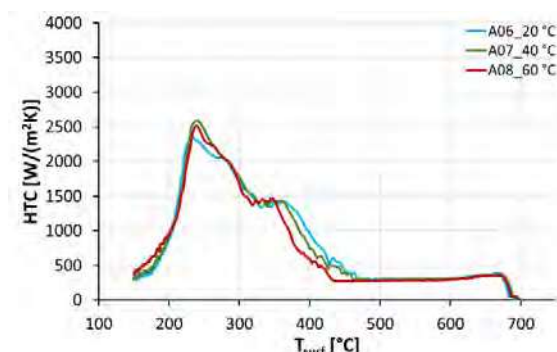
Fig. 7 Average HTC on the surface for 10 % PAG quenchant at different temperatures



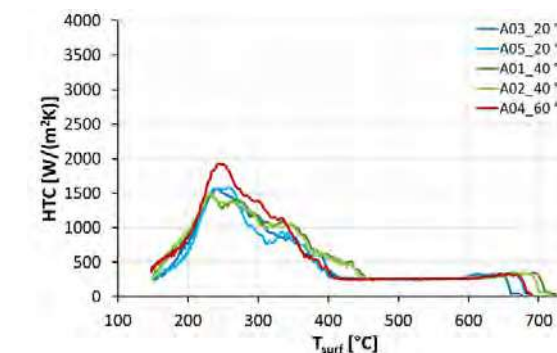
Obr. 8 Graf průměrného HTC na vzorku při různých teplotách chladiva a koncentraci 30 %
Fig. 8 Average HTC on the surface for 30 % PAG quenchant at different temperatures

Ve druhém případě (obr. 8) lze pozorovat nižší součinitele přestupu tepla, a tedy nižší intenzitu chlazení. Povaha závislosti součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě však zůstává stejná. Na obr. 8 je vidět odlišné chování chladiva při koncentraci 30 % a teplotě 60 °C, kdy intenzivnější chlazení nastává až pod povrchovou teplotou 530 °C.

Na obr. 9 a 10 jsou data vyhodnocená z experimentů s chladivem o koncentracích vyšších. Už při koncentraci 50 % (obr. 9) je patrné další výrazné snížení intenzity přenosu tepla. Především ale dochází ke skokové změně této intenzity při povrchové teplotě kolem 450 °C, což podstatně mění celkový průběh ochlazování a bude dále diskutováno.



Obr. 9 Graf průměrného HTC na vzorku při různých teplotách chladiva a koncentraci 50 %
Fig. 9 Average HTC on the surface for 50 % PAG quenchant at different temperatures

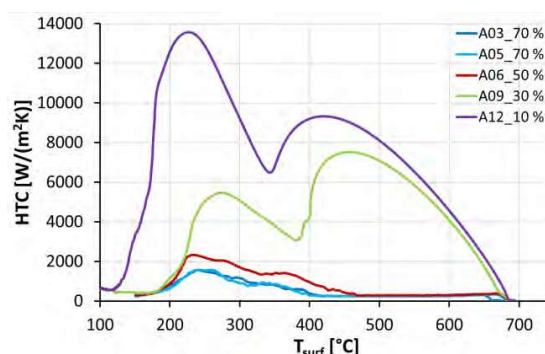


Obr. 10 Graf průměrného HTC na vzorku při různých teplotách chladiva a koncentraci 70 %
Fig. 10 Average HTC on the surface for 70 % PAG quenchant at different temperatures

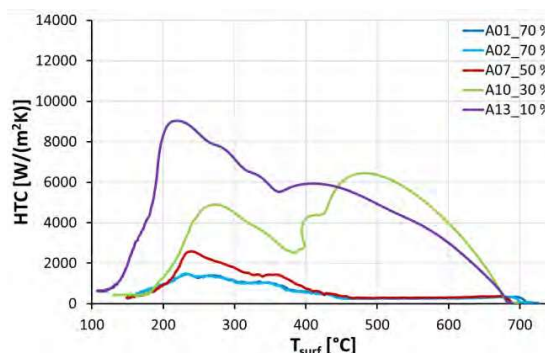
Při použití polymerního roztoku o koncentraci 70 % (obr. 10) byly experimenty s počátečními teplotami 20 a 40 °C pro ověření zopakovány. Je zde názorné snižování povrchové teploty, při které dochází k výrazné skokové změně v této intenzitě. Snižování maxima této intenzity už je ve srovnání s roztokem o koncentraci 50 % poměrně malé.

4.2 Závislosti HTC na teplotě povrchu při různých koncentracích chladiva a dané počáteční teplotě

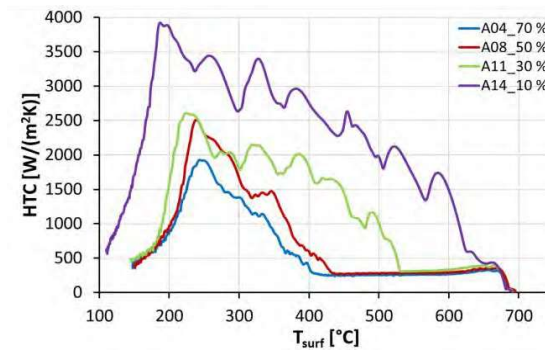
Na obr. 11 – 13 je závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě uvedena pro jednotné počáteční teploty polymerního roztoku (20, 40 a 60 °C) při jeho různých koncentracích.



Obr. 11 Graf průměrného HTC na vzorku při různých koncentracích chladiva za teploty 20 °C
Fig. 11 Average HTC on the surface for concentrations of PAG quenchant at the temperature of 20 °C



Obr. 12 Graf průměrného HTC na vzorku při různých koncentracích chladiva za teploty 40 °C
Fig. 12 Average HTC on the surface for concentrations of PAG quenchant at the temperature of 40 °C

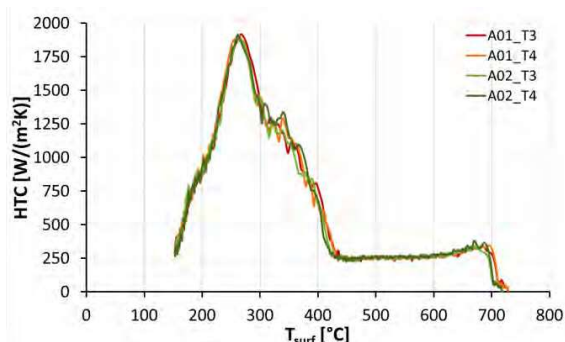


Obr. 13 Graf průměrného HTC na vzorku při různých koncentracích chladiva za teploty 60 °C
Fig. 13 Average HTC on the surface for concentrations of PAG quenchant at the temperature of 60 °C

Pro danou počáteční teplotu chladiva je zřetelné, že povrchové teploty, při kterých dochází ke skokové změně v intenzitě chlazení, se snižují s rostoucí koncentrací chladiva.

4.3 Opakovatelnost experimentu

Pro koncentraci 70% polymeru ve vodě byly opakovány experimenty s počáteční teplotou kapaliny 20 °C (A03, A05) a počáteční teplotou 40 °C (A01, A02). Pro ukázkou byly zvoleny hodnoty z termočlánků ve střední poloze – tedy T3 a T4. Na obr. 14 je vidět dobrá opakovatelnost zaznamenaných hodnot, kde se křivky závislosti součinitele přestupu tepla pro zvolené podmínky experimentu těsně kryjí v celém rozsahu teplot.



Obr. 14 Data z termočlánků T3 a T4 při experimentech A01 a A02
Fig. 14 Data from thermocouples T3 and T4 during experiments A01 and A02

Závěr

Experimenty tepelného zpracování ukázaly výraznou závislost chladicí intenzity na koncentraci polymerního roztoku. Zásadní rozdíly jsou mezi koncentrací chladiva 30 % a 50 %. Zatímco pro běžně užívané koncentrace do 30 % dochází okamžitě k intenzivnímu chlazení, při koncentracích 50 % a vyšších se intenzita chlazení drží pouze kolem 400 W/m²K a při určité povrchové teplotě dochází ke skokovému nárůstu této intenzity. Při počáteční teplotě 60 °C výše uvedený jev nastává dokonce i při koncentracích chladiva nižších. Obecně je tedy možné konstatovat, že chladicí intenzitu není možné plynule měnit změnou koncentrace. Chlazení probíhá buď v režimu blánového, nebo bublinového varu. V oblasti bublinového varu (při nižších koncentracích polymeru přibližně do 40 %) je možné ovlivnit intenzitu chlazení koncentrací chladiva, ale v tomto případě se jedná o poměrně malé rozsahy ve srovnání s rozdíly mezi blánovým a bublinovým varem (obr. 6).

Velmi zajímavý jev se ukazuje při použití roztoku s počáteční teplotou 60 °C. Zde nastává postupná změna povrchové teploty, při které dochází ke skokové změně v intenzitě chlazení pro jednotlivé koncentrace kapaliny.

Dalším důležitým závěrem je fakt, že intenzity chlazení mohou být u určitých koncentrací polymeru silně závislé na teplotě chladiva. Z provozního hlediska je nutno počítat, s jakou přesností je možné udržet teplotu kapaliny v určitém rozsahu. Příliš velké ohřátí kapaliny během chlazení může totiž způsobit závažné změny v předpokládané intenzitě chlazení.

Poděkování

Výsledky tohoto projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) byly získány za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I”.

Literatura

- [1] SANCHEZ, S. G., GASTON, A., TOTTEN, G. E. Computational Modeling of Heat Treating Processes by Use of HT-MOD and ABAQUS. *Latin American Applied Research*, Vol. 41, 2011, pp. 217-224
- [2] RAMESH, G., NARAYAN, K. Prabhu. Spatial Dependence of Heat Flux Transients and Wetting Behavior during Immersion Quenching of Inconel 600 Probe in Brine and Polymer Media. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 45, 2014, issue 4, pp. 1355-1369. DOI: 10.1007/s11663-014-0038-7
- [3] MACKENZIE, D. S. Design of Quench Systems for Aluminum Heat Treating Part I: Quenchant Selection. *Industrial Heating*, Vol. 6, June 2006, pp. 53-57
- [4] EDENS, M. Understanding Quenchants and their Effects. *Industrial Heating*, Vol. 3, March 2006, pp. 49-53
- [5] GORYUSHIN, V. V., SHEVCHENKO, S. Yu. and D02 Committee. On the Use of Polymer Quenchants in Industry. *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 52, 2010, pp. 255-259. DOI: 10.1520/d6666-04r14
- [6] TOTTEN, G. E., WEBSTER, G. M., BATES, C. E. An Overview of Aluminum Quenching with Polymer Quenchants. *Industrial Heating*, Vol. 11, November 1998, pp. 61-66
- [7] Quenchants. *PetroFer Chemie* [online]. 2014 [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: http://www.petrofer.com/fileadmin/user_upload/dokumente/Abschreckmedien_E.pdf
- [8] POTEET, D., TOTTEN, G. E., CANALE, L. C. F. Designing Quench Systems for Induction Hardening: Part I. *Industrial Heating*, Vol. 9, November 2005, pp. 43-46
- [9] TROELL, E., KRISTOFFERSEN, H. Influence of Ageing and Contamination of Polymer Quenchants on Cooling Characteristics. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, Vol. 155, 2010, issue 3, pp. 114-118. DOI: 10.1007/s00501-010-0546-y
- [10] POHANKA, M.: *Technical Experiment Based on Inverse Tasks in Mechanics*. [Ph.D. Thesis], Brno: Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, 2006