

VÝVOJ NÁSTROJE PRO TEPELNĚ-MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ PLECHŮ Z VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ

SVOČ – FST 2019

Bc. Jiří Vrtáček,
Západočeská univerzita v Plzni,
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň
Česká republika

ABSTRAKT

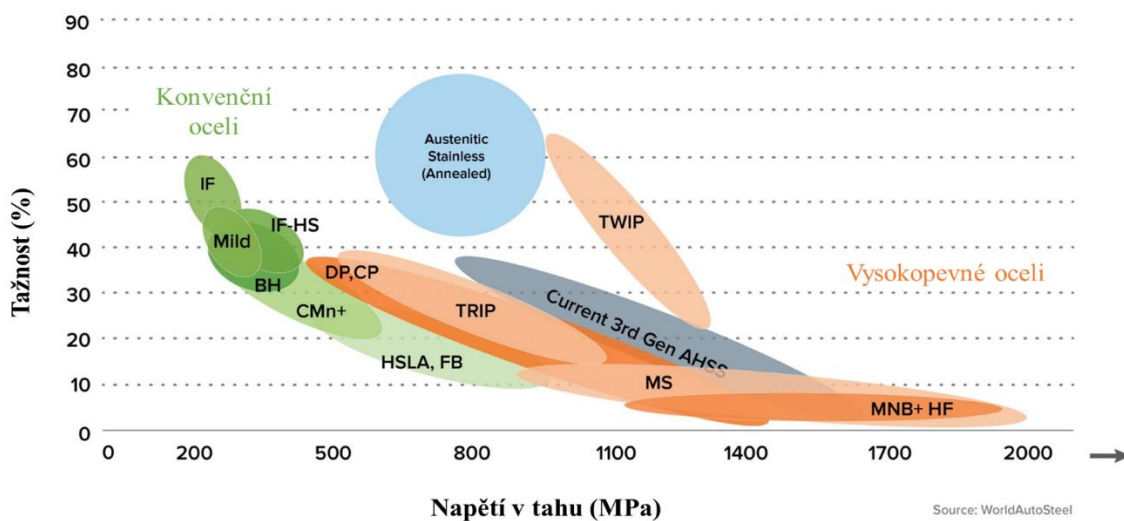
Moderním fenoménem při konstrukci rámu vozidel je snížení hmotnosti dílů redukováním tloušťky plechových polotovarů při zachování či zlepšení mechanických vlastností pro ochranu prostoru s cestujícími. S redukcí hmotnosti se také snižují emise vytvářené spalovacími motory. V průmyslu se čím dál více používají pokročilé materiály s vyšším obsahem manganu a hliníku využívající větší množství mechanismů zpevnování jako je například TRIP (TRansformation-Induced Plasticity) efekt využívající transformaci zbytkového austenitu ve strukturu na martenzit, či TWIP (TWinning-Induced Plasticity) efekt využívající taktéž zbytkového austenitu ve strukturu, kdy je mechanismem zpevnění tvorba austenitických dvojčat. V tomto příspěvku je popsáno moderní zpracování vysokopevných ocelí s celkovým návrhem nástroje pro zpracování navržených experimentálních materiálů, potřebné simulace pro zjištění teplotního pole v pracovní části nástroje a samotné výsledky z provedeného termomechanického zpracování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Press-hardening, AHSS, TRIP, TWIP, termomechanické zpracování

ÚVOD

Motorem vývoje vozidel pro soukromou dopravu je celkové snižování emisí spalovacích motorů. Existuje velké množství způsobů redukce emisních plynů CO_x a NO_x. Mezi ně se řadí snižování hmotnosti komponent karosérie s využitím pokročilých materiálů s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi [1]. Tyto pokročilé materiály zaručují minimálně stejné či lepší mechanické vlastnosti při snížení tloušťky plechových přístřihů. Mezi tyto materiály se řadí takzvané pokročilé vysokopevné oceli třetí generace (Obr. 1) kombinující několik mechanismů zpevnování materiálů. Jedná se o vícefázové oceli užívající majoritně TRIP (TRansformed Induced Plasticity = zpevnění transformací zbytkového austenitu na martenzit) a TWIP (TWinning-Induced Plasticity = zpevnění vznikem austenitických dvojčat ve zbytkovém austenitu) efektu [2,3]. S pokročilými materiály je také potřeba vyvíjet odpovídající tepelné či tepelně-mechanické procesy pro získání potřebné struktury v materiálu. Jedním z procesů využívaných pro zpracování ocelí třetí generace je technologie známá pod pojmem press-hardening [4]. Během této metody dochází k tepelně-mechanickému zpracování plechových přístřihů. Cílem tohoto příspěvku je popsat samotnou technologii press-hardening s návrhem speciálního vyhřívaného nástroje poskytující vhodné teplotní profily pro zpracování plechů z pokročilých vícefázových vysokopevných ocelí třetí generace.



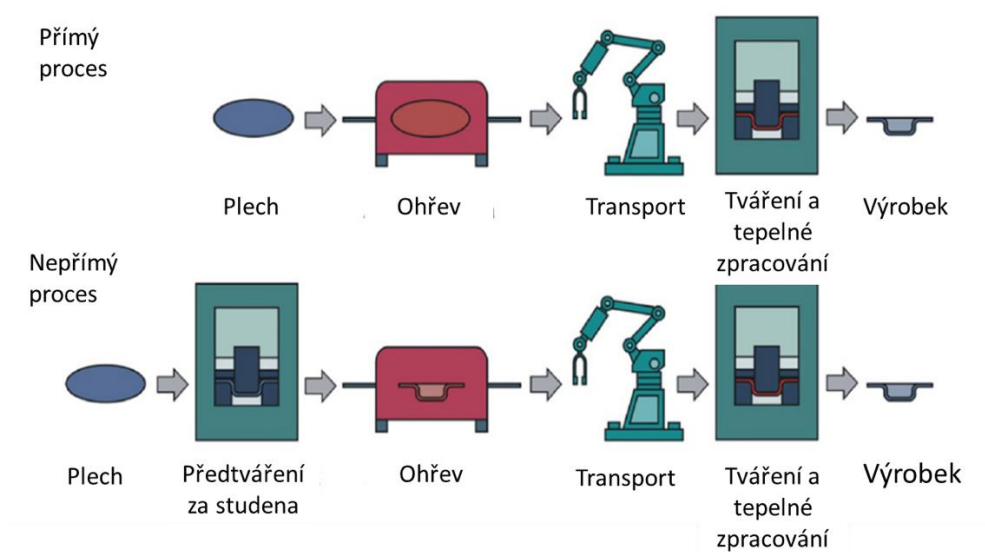
Obr. 1: Graf znázorňující různé typy vysokopevných ocelí (Banana diagram) [3]

TECHNOLOGIE PRESS-HARDENING

Technologie press-hardening je jedna z užívaných metod zpracování vysokopevných ocelí v reálném automobilovém průmyslu. Jedná se o technologii tváření, při které dochází jak k tepelnému zpracování konečného výrobku, tak k vytvoření konečného výrobku s potřebnou geometrií. V závislosti na složitosti geometrie se tato technologie dělí na dva základní procesy, a to na přímý a nepřímý (Obr. 2) [5,6].

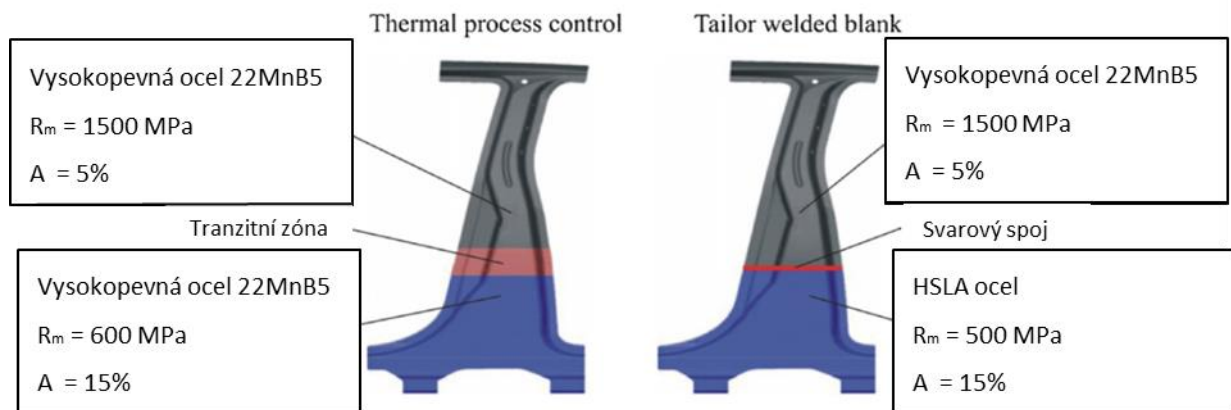
Přímý proces začíná samotným dělením na předem navržené přístříhy. Nadělené přístříhy se vloží do pece (v rámci reálného procesu se jedná o pece průběžné), kde dojde k ohřátí plechu na požadovanou teplotu. Po dostatečném ohřátí s požadovanou výdrží dochází k transportu do nástroje či formy, kde dojde k samotnému termomechanickému zpracování. Po provedení tohoto zpracování je nyní už hotový výrobek vyjmut ze zařízení a je transportován na konečné dochlazení na pokojovou teplotu. Způsobem přímého procesu se zpracovávají například jednotlivé části A-sloupků, B-sloupků či prahů [5,6].

Pro části konstrukce vozidel ze složitějších geometrií se používá druhá, nepřímá metoda. Tato metoda spočívá ve vložení mezikroku v celém procesu. Tento mezikrok spočívá před samotným ohřátím materiálu na požadovanou teplotu, kdy je plechový přístříh předlisován do tvaru polotovaru pro zamezení vytvoření trhlin při hlubokém tažení nebo při tažení komplikovaného tvaru [6].



Obr. 2: Schéma přímého a nepřímého procesu zpracování technologií press-hardening [6]

První užití technologie press-hardening byla pro vytvoření struktury, která je z velké části martenzitická s co nejmenším podílem jiných fází. Této struktury bylo dosaženo díky chlazeným nástrojům, kde se majoritně užívá voda jako chladicího média, která protéká chladicími kanálky navrženými pro co nejlepší odvod tepla od zdroje ve formě předehřátého plechu. Vzhledem k úspoře materiálu a dalších potřebných technologií pro sestavení rámu vozidla došlo k různým úpravám této technologie do dnešní podoby, kdy je snaha získat jeden díl s lokálně rozdílnými strukturami a tím i rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Příkladem může být B-sloupek automobilu (Obr. 3), kdy se prokázalo jako vhodné využít lokálně rozdílných mechanických vlastností. Nejprve se tento díl zpracovával jako dvě části, které se posléze svařily dohromady. V moderní době je snaha získat úpravou samotného nástroje část vyhřívanou na teplotu pro proběhnutí správného tepelného zpracování se vznikem pevného a houževnatého materiálu a na část chlazenou pro získání tvrdého, ale křehkého materiálu [5,6].



Obr. 3: Porovnání B-sloupku zpracovaného ve speciálním nástroji se svařovaným [6]

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Pro experiment byly zvoleny nízkolegované vysokopevné oceli s označením C3Mn1,4Al a C3Mn2Al, které mají velmi podobné chemické složení. Liší se pouze v obsahu hliníku (Tab. 1), což ovlivňuje teploty fázových přeměn, kdy v případě materiálu C3Mn2Al jsou teploty fázových přeměn vyšší. Tento rozdíl byl zvolen z důvodu zjištění vlivu různého poměru manganu a hliníku na vývoj struktury a mechanické vlastnosti. Tyto dva legující prvky vedle křemíku zlepšují mechanické vlastnosti, především pevnost v tahu a tažnost. Jedná se o materiály spadající do kategorie třetí generace vysokopevných ocelí, které vykazují pevnost 900-1300 MPa s tažností až 30%. Třetí generace vysokopevných ocelí kombinuje výhody přechodných dvou generací. Hlavní výhodou je vysoká pevnost díky mechanismům zpevňování typu TRIP a TWIP při využití menšího podílu legujících prvků (mangan, křemík a hliník) za vzniku vícefázové struktury s dosažením menších nákladů než tomu bylo při vývoji druhé generace vysokopevných ocelí. Pro získání vícefázové mikrostruktury technologií press-hardening bylo třeba navrhnout speciální nástroj, který je popsán v další kapitole.

Tab.1: Chemické složení experimentálních materiálů

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Nb
C3Mn1,4Al	0,22	0,59	3,06	0,008	0,003	0,19	0,052	0,097	0,012	1,45	0,064
C3Mn2Al	0,22	0,56	3,13	0,008	0,003	0,17	0,077	0,098	0,13	2,02	0,068

NÁVRH NÁSTROJE

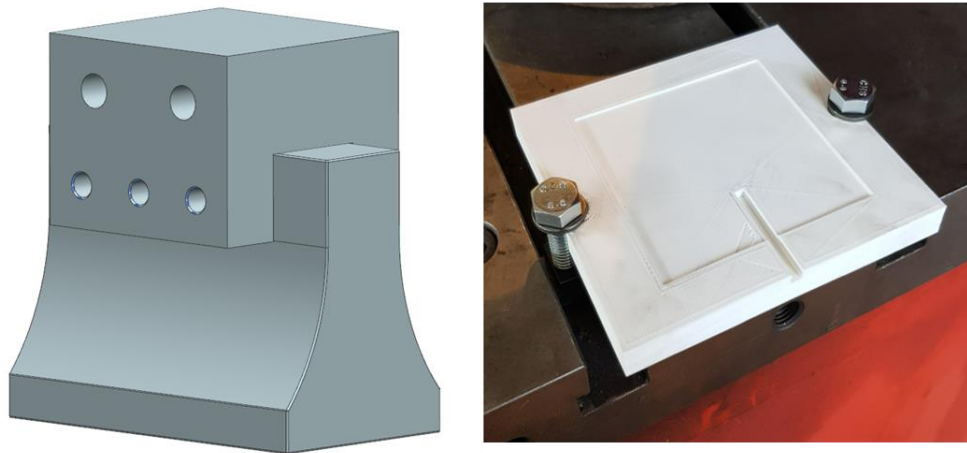
Pro samotný návrh nástroje bylo třeba nejdříve stanovit základní parametry zpracování experimentálních materiálů. Mezi hlavní vstupní parametry patří zpracování pokročilých vícefázových vysokopevných ocelí třetí generace s požadavkem dosažení mikrostruktury tvořené převážně bainitem, martenzitem a zbytkovým austenitem. To je docíleno potřebnou rychlostí ochlazování, která roste se zvětšujícím se rozdílem teploty předehřátého plechu a nástroje a samotnou teplotou v pracovní části nástroje v rozmezí 400 až 450 °C, kde se u experimentálních materiálů nachází oblast bainitické transformace. Polotovar je ve formě plechového přístříhu s rozměry 100x100 mm s tloušťkou plechu pohybující se od 1,5 do 2 mm. Pro další výzkum v této oblasti je také

potřeba získat velmi důležitá data průběhu teplot v reálném procesu, tudíž je třeba měřit teplotu v oblasti pracovní části nástroje, ale také je nutné měřit teplotu na samotném plechovém polotovaru po celou dobu procesu.

Prvním návrhem nástroje bylo takzvané rozšíření kovadel spočívající v upevnění na stávající kovadla modelu kovacího lisu CKW 6000. Tento model (Obr. 4 vlevo) dosahuje rozměrů 140x140x110 mm s upnutím na stávající kovadla pomocí sevření šrouby. Pro materiál samotného nástroje byla zvolena nástrojová ocel X40CrMoV5 (Tab. 2), jedná se o nástrojovou ocel používanou pro práci za tepla. Dle normy ČSN se jedná o ocel 19 554. Tyto rozměry byly zachovány jako vyhovující, ovšem tento návrh nesplňoval potřebnou rovinnost v pracovní části nástroje, což by vedlo k špatnému kontaktu se zpracovávaným polotovarem.

Tab. 2: Chemické složení nástrojové oceli užitě pro nástroj v hm.% [7]

Prvek	C	Cr	Mo	V
Hm. %	0,40	5,30	1,40	1,00

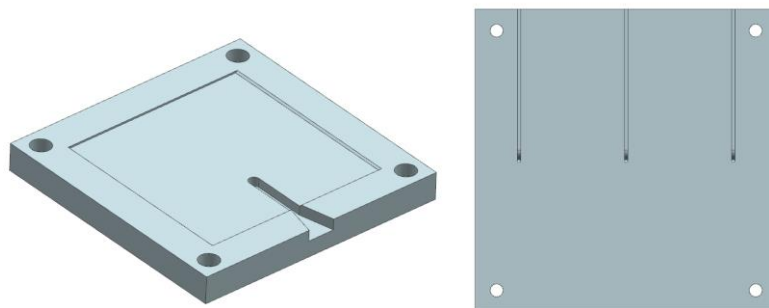


Obr. 4: První návrh "rozšíření kovadel" (vlevo), model pro ověření geometrie (vpravo) (modelováno pomocí SW Siemens NX verze 11.0.2.7)

V následujícím kroku došlo k rozdělení na dvě části, a to na část vytápěného hranolu s výškou 95 mm, který obsahuje otvory pro topné patrony o výkonu 800 W s možností vyvinout teplotu v nástroji až 600 °C a na výměnné desky, které jsou činnou částí nástroje s výškou 15 mm. Toto řešení má hlavní výhody ve snazší výrobě drážek pro termočlánky snímající teplotu nástroje a možnost výměny za jiné desky různých tvarů.

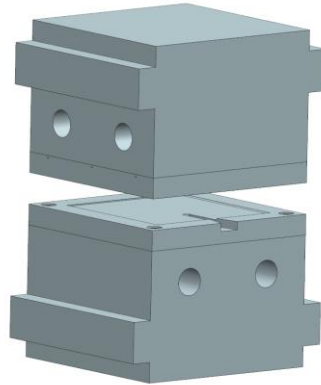
Během návrhu došlo taktéž k výrobě reálného modelu vytvořeného pomocí 3D tiskárny (Obr 4 vpravo) pro ověření správnosti návrhu a provedení zkoušek zakládání plechu s připevněným termočláňkovým drátem. U takto navržené desky byl objeven problém se štěrbinou pro uložení termočláňkových drátů.

Řešením byla úprava této štěrbinu, přesněji došlo k mírnému zvětšení šířky a hloubky štěrbinu, taktéž byla štěrbinu na konci upravena přidáním rádiusu pro lepší založení drátu a ústí bylo rozšířeno pro lepší manipulaci s plechem při jeho zakládání. Výsledkem byl konečný model (Obr. 5), který obsahuje upravenou štěrbinu, zahlobení pro správné umístění plechového polotovaru a drážkami pro celkem 6 termočláňků, dvou řídicích a čtyř měřících.



Obr. 5: Konečný návrh výměnné desky

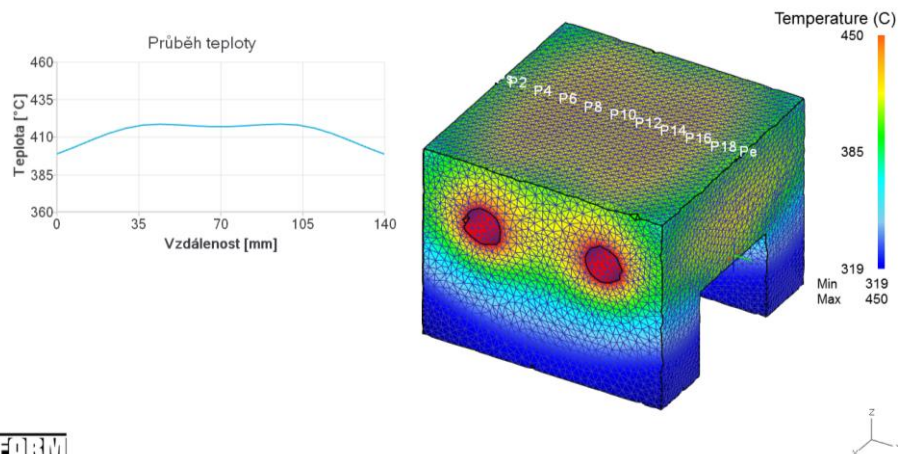
Poslední úpravou nástroje bylo přepracování upevnění těla nástroje do kovacího lisu. Vzhledem k nepřesnostem v rovinnosti činných ploch nástroje byla vytvořena varianta upevnění na pracovní desky lisu s T-drážkami pomocí výstupků na bocích hlavního těla nástroje a upínek v kovacím lisu. Taktéž došlo k natočení os topných patron kolmo na sebe pro získání rovnoměrnějšího teplotního pole na pracovních deskách, které bylo dále zkoumáno pomocí simulací. Konečné rozměry nástroje v uzavřeném stavu jsou 140x140x220 mm (Obr. 6).



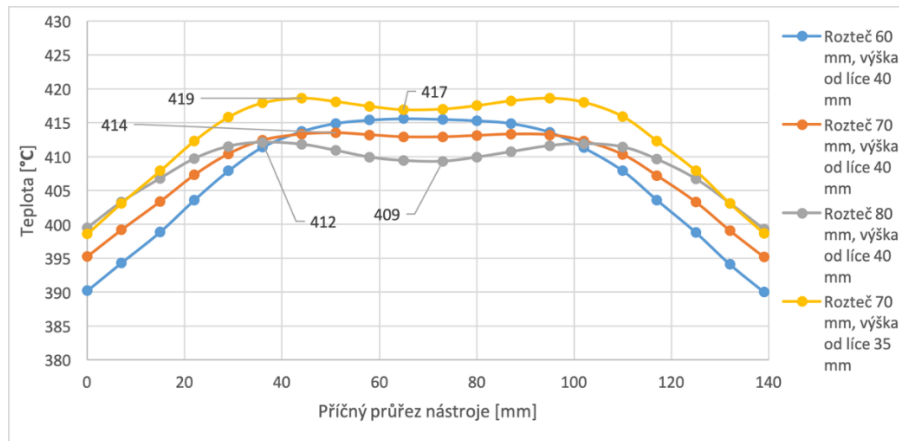
Obr. 6: Sestava nástroje

FEM SIMULACE OHŘEVU NÁSTROJE

První výpočty byly provedeny na variantě s upnutím na kovádla kovacího lisu, těmito simulacemi se zkoumala nejvhodnější poloha topných patron. Bylo zjišťováno rozložení teplotního pole jednodílných “rozšíření kovadel” s roztečí topných patron v rozmezí 60 až 80 mm a vzdáleností od horního líce 35 a 40 mm během vyhřívání pomocí topných patron, u kterých dosahovala teplota 450°C (Obr. 7 a 8). Na základě těchto simulací byla zvolena nejvhodnější poloha topných patron (rozteč 70 mm a osová vzdálenost od horního líce 40 mm). Toto umístění zajišťuje dostatečně rovnoměrný ohřev s minimálním poklesem teploty ve středu a na krajích pracovní plochy nástroje.



Obr. 7: Schéma získávání dat pro graf průběhu teploty (použitý software DEFORM-2D/3D verze 11.2.0.1)



Obr. 8: Graf výsledných hodnot průběhu teploty

DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

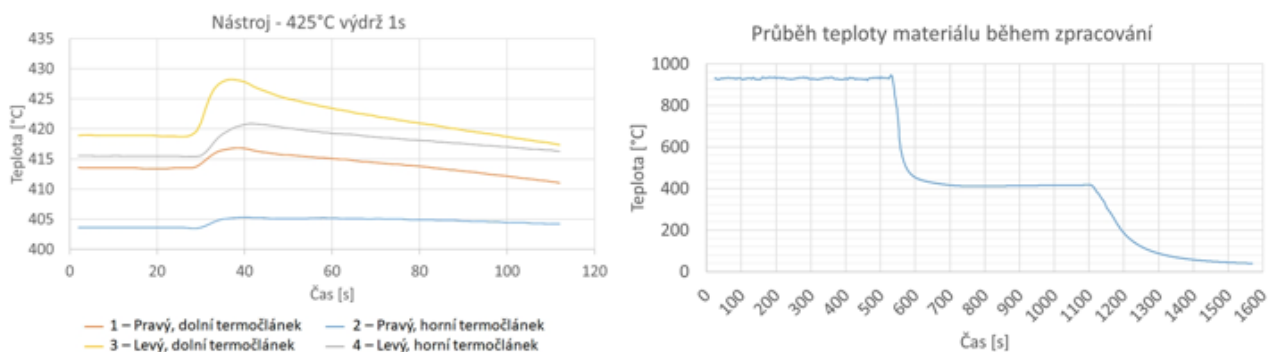
Po poslední úpravě návrhu byla provedena výroba nástroje a jeho odzkoušení. Na zvolených experimentálních ocelích byly zkoumány dvě teploty nástroje a dvě různé doby výdrže. Plechové vzorky byly ohřáty na 950 °C s dobou výdrže na teplotě 15 minut. Plechy byly transportovány do nástroje o pokojové teplotě nebo o teplotě 425 °C s dobou výdrže v nástroji 1 sekunda nebo 5 minut.

Z naměřených dat pomocí termočlánků byly sestaveny průběhy teplot jak pro nástroj, tak zkoušený plechový polotovár (Obr. 9). Ze záznamu průběhu teploty nástroje během zpracování je zřejmé, že vložením přehřátého polotovaru došlo k rychlému nárůstu teploty nástroje až o 30 °C během 5 sekund.

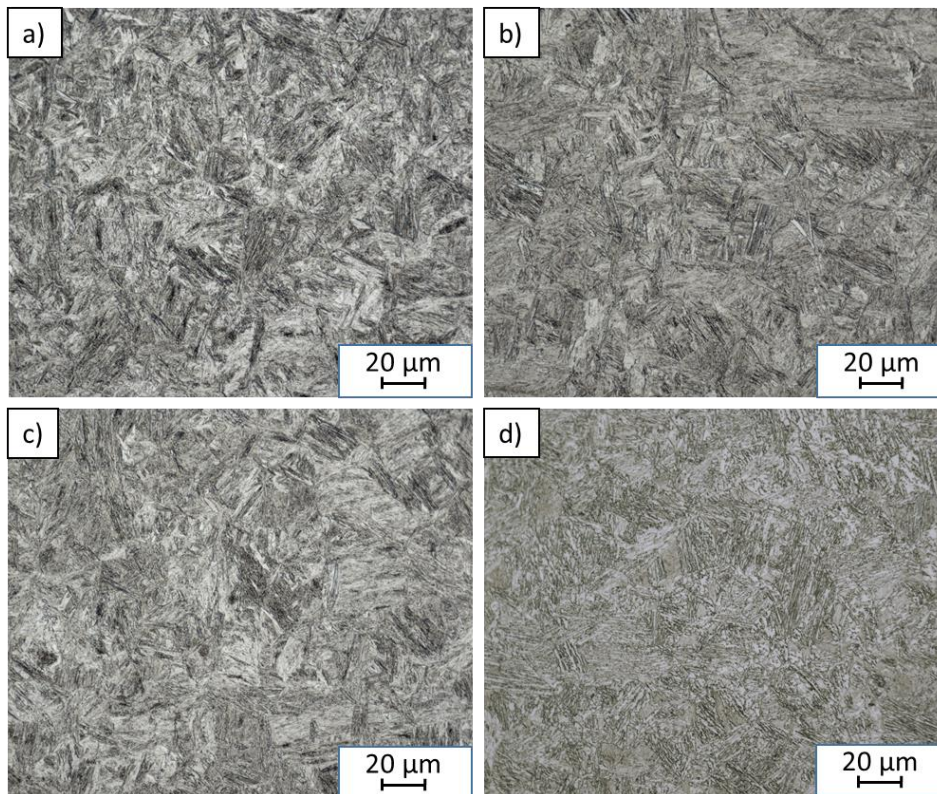
V případě materiálu C3Mn1,4Al byla po kalení do nástroje o RT v obou případech výdrže 1 s. i 5 min. získána martenzitická struktura s malým podílem bainitu (Obr. 10a,c). Pokud došlo k navýšení podílu hliníku na 2% u materiálu C3Mn2Al byla struktura po kalení do nástroje o RT zjištěna přítomnost i volného feritu (Obr. 11a). Podíl volného feritu byl nižší v případě výdrže v nástroji 5 min. (Obr. 11c).

Při výdrži v přehřátém nástroji na teplotu 425°C byla struktura u materiálu C3Mn1,4Al martenziticko-bainitická (Obr. 10b). Podíl bainitu se zvýšil, pokud byla v nástroji provedena výdrž 5 minut. Poté byla struktura spíše bainitická (Obr. 10d).

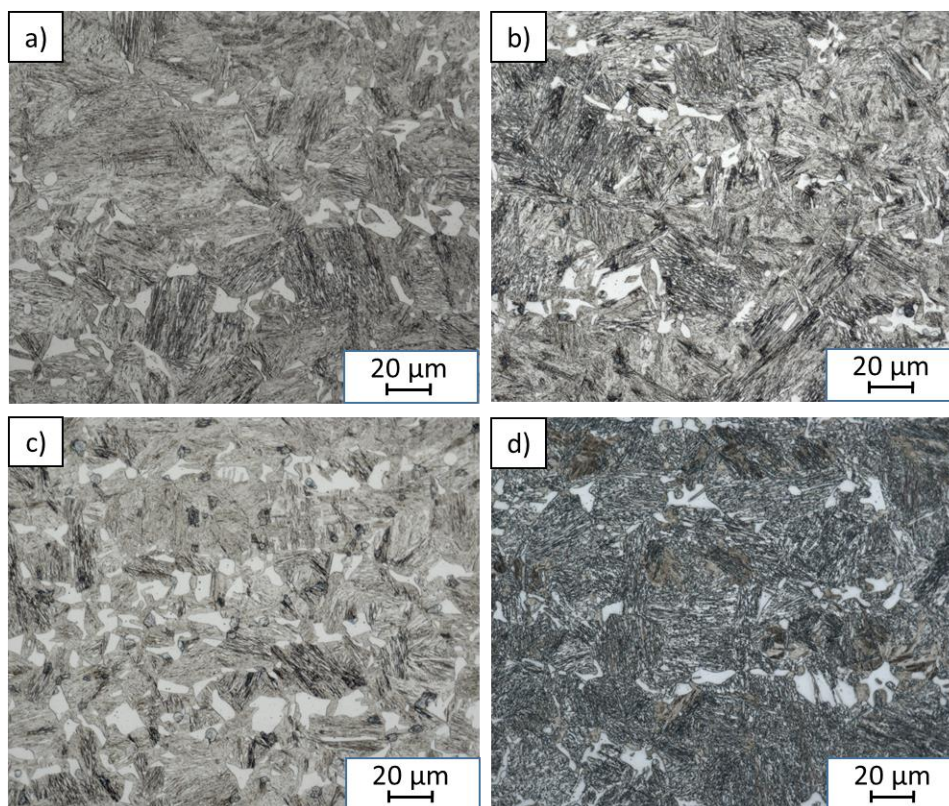
U druhého experimentálního materiálu C3Mn2Al se kalení do nástroje vyhřátého na teplotu 425°C projevilo navýšením podílu bainitu (Obr. 11b), jehož podíl se s prodloužením v nástroji zvyšoval. Po výdrži v nástroji 5 minut byla struktura tvořena bainitickou maticí s malým podílem volného feritu a malými ostrůvky martenzitu, který pravděpodobně vznikl z nedostatečně stabilizovaného zbytkového austenitu při ochlazení na RT po vyndání z nástroje (Obr. 11d).



Obr. 9: Grafy získané z termočlánků v nástroji (vlevo) a na zkoušeném materiálu (vpravo)



Obr. 10: Získané mikrostruktury materiálu C3Mn1,4Al0,5Si: a) 20°C/1s, b) 425°C/1s, c) 20°C/5min., d) 425°C/5min



Obr. 11: Získané mikrostruktury materiálu C3Mn2Al0,5Si, a) 20°C/1s, b) 425°C/1s, c) 20°C/5min., d) 425°C/5min

ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Po postupné optimalizaci výsledného tvaru nástroje pro technologii press-hardening byla provedena jeho výroba a úspěšné odzkoušení. Jedná se o první krok v návrhu komplikovaného nástroje pro hluboké tažení plechů z pokročilých vícefázových ocelí třetí generace. V současnosti je v provozu funkční prototyp s rovnými deskami se zajištěním ohřevu nástroje až na teplotu 450 °C. Výsledná mikrostruktura byla vyhodnocena jako vícefázová bainiticko-martenzitická. V současnosti probíhá výroba mezikroku pro tepelně-mechanické zpracování ve formě výměnných vložek s tvarovým omega profilem a s hloubkou tažení 30 mm a návrh složitého komplexního nástroje.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek obsahuje výsledky vytvořené v rámci projektu SGS-2018-045 Výzkum moderních AHSS ocelí a inovativních procesů pro jejich zpracování. Projekt je dotován ze specifických zdrojů státního rozpočtu pro výzkum a vývoj.

LITERATURA

- [1] KARBASIAN, H., TEKKAYA, A. E. (2010). A review on hot stamping. In: Journal of Material science and Processing Technology. Vol. 210, pp. 2103-2118.
- [2] MORI, K., BARIANI, P.F., BEHRENS, B.-A., et. al (2017) Hot stamping of ultra-high strength steel parts, CIRP Ann. – Manuf. Technol. 2017, vol. 66, pp. 755-777
- [3] TAMARELLI, C. M., *AHSS 101: The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications*, [online], 2011. [cit. 8.4.2019]
<https://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Research/AHSS/AHSS%20101%20%20The%20Evolving%20Use%20of%20Advanced%20High-Strength%20Steels%20for%20Automotive%20Applications%20-%20lr.pdf>.
- [4] BILLUR, E., ALTAN, T., *Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part III*, STAMPING journal, [online], 2014, [cit. 8.4.2019]
https://ercnsm.osu.edu/sites/ercnsm.osu.edu/files/uploads/S_FormingAHSS/664-3.pdf.
- [5] NEUGEBAUER, R., et. al., *Press hardening - An innovative and challenging technology*, Archives of civil and mechanical engineering 12, 2012, s. 113-118.
- [6] KARBASIAN, H., TEKKAYA, A.E., *A review on hot stamping*, Journal of Materials Processing Technology 210, 2010, s. 2103-2118.
- [7] Dörrenberg Edelstahl, *Materiálový list X40CrMoV5-1*, [online], [cit. 31.3.2019],
https://www.doerrenberg.de/uploads/tx_c1x1downloads/1.2344_en.pdf.