

Giga casting ako technologická revolúcia vo výrobe automobilov

Dana Bolibruchová, prof. Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva Strojnícka fakulta,

Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1, 01026 Žilina.

E-mail: danka.bolibruchova@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2772

Giga casting as a technological revolution in automobile production

Abstract: *Giga casting* is referred to as a technological revolution in automobile manufacturing. Large *aluminium* castings are increasingly used for the production of automotive vehicles, especially for electric vehicles with low weight and to reduce production costs. Since most of them are structural components loaded quasi-statically, dynamically and cyclically, the quality and quantifiable performance of extremely large *aluminium* castings is crucial for their production. This article briefly analyses the current state of the art in the field of giga castings, some examples of their use in the automotive industry, their benefits and advantages.

Keywords: automotive innovation, future of manufacturing, giga casting, aluminium alloys, electric vehicles.

ÚVOD

Giga casting umožňuje pomocou zariadení giga press výrobu obrovských dielcov automobilových súčastí, karosérií a pod. Ide o tlakové liatie *hliníkových* zliatin, ktorým sa vyrábajú rozmerovo veľké odliatky (napr. predná aj zadná časť skeletu karosérie prepojená tzv. integrálnou batériou, vane na batérie a pod.). Termín „*giga*“ odráža tradíciu *Tesly* nazývať svoje výrobné závody „*Gigafactories*“. Iní výrobcovia automobilov opisujú podobné technológie ako megaprocesy s megapressmi. Vo vedeckej literatúre sa hovorí ako o odlievaní ultra veľkých odliatokoch.

Cieľom výroby ultra veľkých *hliníkových* odliatok sú požiadavky automobilového priemyslu na zníženie hmotnosti automobilu, na zlepšenie palivovej účinnosti spaľovacích motorov a hlavne spotrebu energie batérií v elektrických vozidlách [1].

Používanie *hliníkových* zliatin v automobilovom sektore podľa [2] zaznamenalo za posledné štyri desaťročia obrovský rast s minimálne 3,5 % ročnou mierou rastu. Hmotnostný podiel *hliníkových* odliatok v automobile výrazne narastá. Ako elektrifikácia vozidla napreduje, zrýchľuje sa dopyt najmä *hliníkových* tvarovo komplikovaných odliatokoch. Tento trend je poháňaný potrebou kompenzácie hmotnosti, napr. veľkých akumulátorov/batérií s cieľom predĺžiť jazdu rozsah vozidiel. V priebehu ostatných rokov sa *hliníkové* tvarové odliatky používali hlavne v hnacom ústrojenstve motora ako sú bloky motorov, hlavy valcov na komponenty prevodovky, puzdrá atď. V

súčasnosti dochádza k prechodu na karosérie a podvozky vozidla, najmä na vane batérií elektrických vozidiel, s cieľom znížiť aj výrobné náklady [2].

Cieľom článku je poskytnúť kritickú analýzu kľúčových faktorov, ktoré ovplyvňujú kvalitu, mikroštruktúru a vlastnosti takto vyrobených odliatok, načrtnúť príležitosti a výzvy danej technológie.

1 ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU

Výhodami a benefitmi technológie *giga castingu* sú:

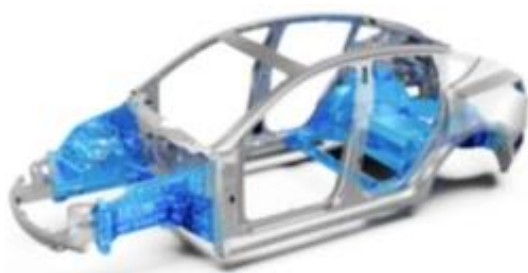
- Zjednodušená výroba:** umožňuje vytváranie veľkých integrálnych dielov, ktoré nahrádzajú viacero menších komponentov, čo zjednodušuje proces montáže. Toto *skraca* výrobný čas, *minimalizuje zložitost' dodávateľského reťazca* a *znižuje náklady na pracovnú silu*, vďaka čomu je výrobný proces efektívnejší. Udáva sa zníženie počtu dielov (o 60+), ktoré sa predtým museli jednotlivito lisovať, vytláčať, odlievať apod. a zostavovať do subsystému karosérie t. j. *giga* odliatky umožňujú znížiť hmotnosť karosérie, vozidiel, zjednodušiť výrobu nahradením veľkého množstva dielov a pod. [3, 4].
- Zlepšená štruktúrna integrita odliatku:** jednotlivé komponenty majú zvýšenú tuhosť a tým aj odolnosť a vyššiu bezpečnosť vozidla.
- Zníženie hmotnosti:** znížením počtu dielov a zvarov znižuje technológia aj celkovú hmotnosť vozidla. To je výhodné najmä pre elektrické

vozidlá, pretože ľahšie autá majú väčší dojazd a vyššiu energetickú účinnosť.

- d) *Zníženie nákladov do investícií nástrojov*: udáva sa cca 40 %.
- e) *Flexibilita inovatívneho dizajnu*: umožňuje vytvárať jedinečné štrukturálne tvary, ktoré je ťažké alebo nemožné dosiahnuť tradičnými metódami [3, 4].

Možnosti využitia *ultra veľkých hliníkových odliatkov*.

Príekopníkom v *giga castoch* bola automobilka *Tesla*, ktorá cca pred 3 rokmi začala používať *giga casty* na predné a zadné časti automobilu v modeli *Y* (obr. 1) [5].



Obr. 1. *Tesla*, model *Y* s *giga* odliatkami [5]

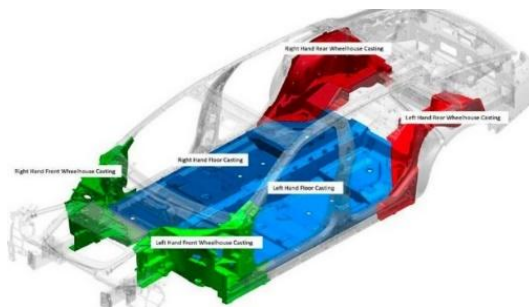
Tieto dva odliatky nahradili 171 dielov (väčšinou plechové výlisky spolu s niektorými menšími odliatkami), eliminovalo 1600 zvarov, a odstránilo sa 300 robotov. Oba diely sú vyrábané technológiou *HDPC* s 6000 t uzamykacou silou [6].

General Motors použil šesť *hliníkových ultra veľkých odliatkov* na vytvorenie jedného celku spodnej konštrukcie karosérie pre vozidlo *Cadillac Celestiq* [7] (obr. 2). Každý *giga* odliatok nahradil viac než 30 jednotlivých dielov. Tieto komponenty tvoria prednú a zadnú konštrukciu spolu s dvoma odliatkami dlhými 2,5 metra, ktoré sú zlepené a bodovo zvarené, aby vytvorili jednotnú podlahovú dosku (obr. 2 b). Tento konštrukčný model umožňuje použiť pri opravách už dnes osvedčené postupy. Podobne uvažuje aj *Toyota*, ktorá zvažuje použitie *giga* liatia, ale spôsobom, ktorý by nepredražoval a nekomplikoval opravy. Karoséria by sa tak skladala z väčšieho počtu odliatkov, ako je to pri *Tesle*.

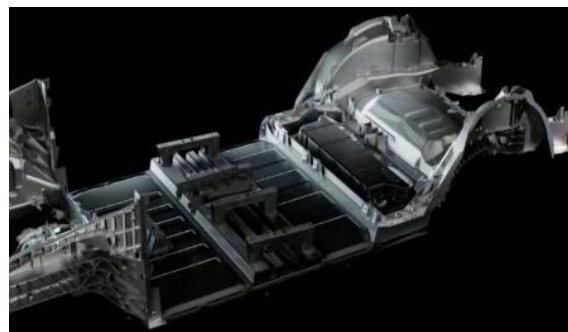
Automobilka *Mercedes Benz* na odľahčenie *giga* odliatkov začala používať aj bionický dizajn materiálu, ktorý tvorí jadro *giga* odliatkov (obr. 3 a obr. 4).

V rámci informácie je tiež nutné dodať, že sa na *Slovensku* začala sa výstavba novej továrne *Volvo*, ktorá bude využívať technológiu *giga press* s uzamykacou silou 9000 t. Ultra veľké odliatky by sa mali vyrábať pre elektrické vozidlá *Volvo*.

Dostupnosť konkrétnych informácií o *giga* odliatkoch je veľmi strohá, množstvo informácií je utajených.



a) [1]



b) [3]

Obr. 2. *Cadillac Celestiq* s *giga* odliatkami, ktoré tvoria spodnú konštrukciu karosérie, rám podvozku.



Obr. 3 Mercedes Benz s príkladom *giga* odliatku [3]



Obr. 4 Príklad bionického dizajnu materiálu [3]

1.1 Výzvy s ultra veľkými hliníkovými odliatkami

Výzvy sú spojené s mimoriadne veľkými *hliníkovými odliatkami* napriek príležitostiam a niektorým výhodám, ako už bolo v predchádzajúcom spomenuté. Výzvy súvisia hlavne s kvalitou týchto odliatkov.

Proces výroby kvalitného ultra veľkého *hliníkového tvaru odliatku* je mimoriadne náročný nielen kvôli veľkosti *giga* odliatku ($\sim 1 \div 2 \text{ m} \times 1,5 \div 2 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$), ale súvisí aj s obrovskou maticou/formou na jeho

výrobu. Napríklad vysoká uzatváracia sila *giga* pressu (plocha odliatku viac ako 1,5 m²), obrovské prídavné zariadenia roboty/žeriavy atď. Veľkosť matrice a najmä teplotný režim formy sú veľkou výzvou.

Taktiež problematickým sa ukazuje *proces tuhnutia giga* odliatkov. Počas procesu odlievania hrubšie časti odliatkov prirodzene vychladnú a stuhnú oveľa pomalšie ako tenšie časti. Výsledkom je väčšie zmrašťovanie, vznik pórovitosti a iných zlievarenských chýb. Okrem toho, obrovské veľkosti *giga* odliatkov vedú k dlhšej vzdialenosti toku kovu. Uvedený fakt má za následok taktiež viac chýb odliatkov, ako napr. je zachytený vzduch, oxidy a pod. Komplikovanosť odliatkov so zložitými geometriami, integrovanými výstupkami, hlbokými rebrami, rôznymi hrúbkami stien, dlhou dĺžkou toku na vyplnenie celej dutiny *giga* odliatku vytvára podmienky na vznik veľkého množstva tepelných uzlov, studených spojov, externe stuhnutých kryštálov a pod. Množstvo kovu vtlačaného *giga* *pressmi* do dutiny formy sa pohybuje turbulentne, čo výrazným spôsobom zvyšuje reoxidačné procesy a tým aj tvorbu oxidov.

Mnoho ďalších aspektov procesu (napr. vákuum, mazanie formy, tepelný manažment formy, vyhadzovanie dielov atď.) je oveľa komplikovanejšie pri *giga* odliatkoch. Preto je mimoriadne náročné vyrobiť napr. celú prednú/zadnú časť, spodok karosérie alebo vane na batérie ako jeden obrovský vysokokvalitný odliatok. Miera vratného materiálu vzhľadom na zdravosť odliatkov môže byť veľmi vysoká [1].

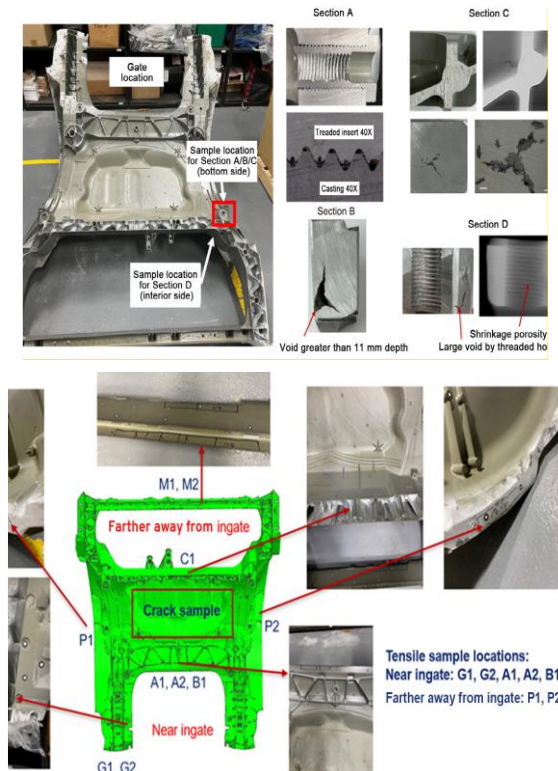
Z uvedených skutočností je možné konštatovať, že proces výroby *giga* odliatkov je náchylný na vznik množstva chýb. A preto najväčšími výzvami sú predikcia kvality odliatkov.

2 PRÍKLADY HODNOTENIA GIGA ODLIATKOV

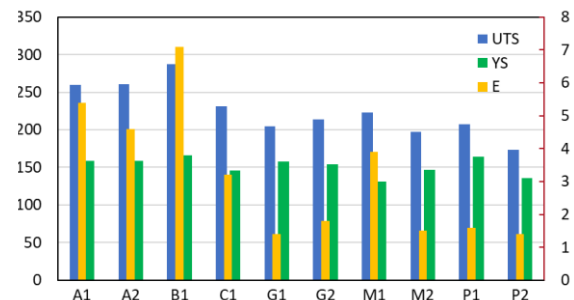
Keďže je veľmi málo publikovaných literárnych zdrojov s analýzou chýb a hodnotením reálnych problémov, prezentujem iba jeden *giga* odliatok (obr. 5) s popisom chýb v rôznych častiach. Identifikované boli stiahnutiny, pórovitosť a zahľtený plyn.

Dosiahnutie rovnakých, resp. podobných vlastností v hodnotených častiach *giga* odliatku napr. mechanických vlastností, bude veľmi náročné ako ukazuje obr. 6. Ako je možné vidieť, mechanické vlastnosti sa výrazne líšia v rôznych hodnotených miestach. Medza pevnosti v ťahu (UTS) sa pohybuje od 175 do 280 MPa, ťažnosť (E) od cca 1 % do 8 %, čo sú veľmi veľké rozdiely v mechanických charakteristikách. Medza klzu (YS) má relatívne stabilné hodnoty. Tieto veľké zmeny mechanických vlastností (zvlášť nízka pevnosť a ťažnosť) sa

pripisujú zlej kvalite odliatku, najmä prítomnosťou množstva chýb odliatkov.



Obr. 5. Analýza chýb v rôznych častiach *giga* hliníkového odliatku [1].



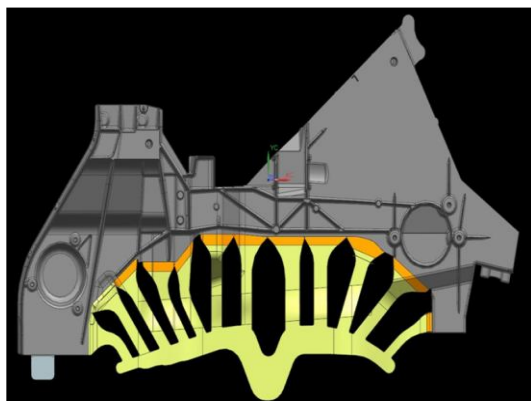
Obr. 6. Mechanické charakteristiky v rôznych miestach *giga* odliatku [1].

2.1 Návrh vtokovej sústavy pre *giga* odliatky - jednoduchá prípadová štúdia

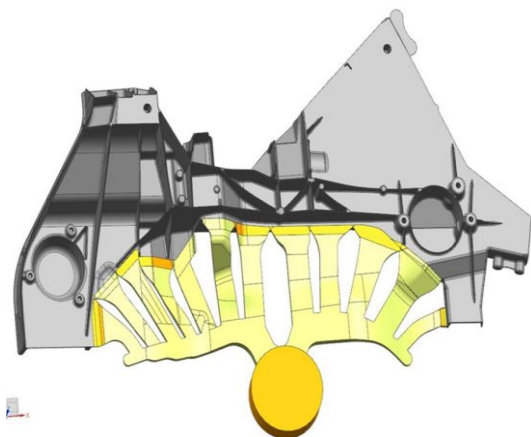
Návrh vtokového systému je veľmi dôležitý. Ako je všeobecne známe, optimálny dizajn vtokovej sústavy môže výrazne znížiť turbulentné prúdenie roztaveného kovu, čím sa minimalizuje množstvo plynu a *reoxidačných* splođín. Pre výrobu kvalitných hliníkových odliatkov, sa musí použiť návrh pretlakového vtokového systému. Vo všeobecnosti, rýchlosť taveniny počas plnenia formy by sa mala udržiavať pod kritickou rýchlosťou 0,5 m·s⁻¹ [8], aby sa zabránilo turbulenciám taveniny a strhávaniu oxidického filmu.

Malé zmeny napr. v zaústení vtokovej sústavy, hrúbky zárezov a pod. medzi príkladmi a) = 1 na grafe 7c a b) = 2 môže viesť napr. k odlišnému množstvu unášaného vzduchu počas plnenia formy, ako je

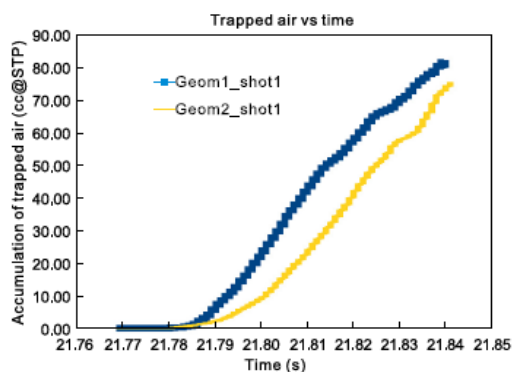
znázornené na obr. 7c. Návrh 2 pravdepodobne znižuje zachytený vzduch počas fáz plnenia pomocou napr. použitím širších zárezov.



a)



b)



c)

Obr. 7. Návrh 2 typov zaústení vtokových sústav pre *giga* odliatky a), b), c) integrálne porovnanie zachyteného vzduchu medzi dvoma konštrukčnými typmi vtokových sústav [1]

Pre *HPDC* je však potrebné dokončiť plnenie formy v priebehu krátkeho času. Minimálna rýchlosť taveniny v prítokoch sa zvyčajne riadi okolo $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, čo je 80-krát viac ako kritická rýchlosť. Obrázok 7 zobrazuje príklad dvoch návrhov vtokových sústav pre odliatky.

2.2. Teplota formy

Kvôli zložitosti geometrie *giga* odliatkov a meniacej sa hrúbky steny v odliatku, ideálna teplota formy by nemala byť rovnaká v celej dutine formy. Na dosiahnutie

ideálneho rozloženia teploty formy je odporúčaný systém ohrevu a chladenia t.j. lokálny teplotný manažment.

2.3 Teplota liatia

Na dosiahnutie optimálnej kvality odliatku a požadovaných mechanických vlastností sa odporúča cca o 50°C až 100°C vyššia ako teplota tavenia zliatiny. Súvisí to s oveľa dlhšou vzdialenosťou toku kovu v porovnaní s bežnými odliatkami. Stanovenie optimálnej teploty liatia je veľmi dôležité nielen pre kvalitu odliatkov, ale aj pre životnosť formy.

Rýchlosť a čas liatia, spôsob ochrany formy, lineárne zmraštenie a zmeny rozmerov *giga* odliatkov, ale aj ďalšie technologické parametre sú veľmi dôležité k odlievaniu zhodných a kvalitných odliatkov, ale v článku nebudú rozoberané.

2.4 Uhlíková stopa a udržateľnosť

Na výrobu *giga* odliatkov sa odporúča používanie primárnych zliatin, bez vratného materiálu čo robí z výroby proces vysokou uhlíkovou stopou. Preto je snahou zvýšiť podiel vratného materiálu vo vsádzke. Napr. Volvo uvádza, že jeho projekt *giga casting* by chcel výrobu udržateľnosti uhlíkovej neutrality dosiahnuť do roku 2040 [9].

Taktiež opravy *giga* odliatkov automobilov by boli veľmi nákladné a časovo náročné. Na rozdiel od opravy vozidla bez *giga* odliatkov môže mechanik jednoducho odstrániť a vymeniť poškodenú časť [4, 10]. Na vyriešenie tejto výzvy je potrebné navrhnuť *giga* odliatok „na opravu“. Napríklad *General Motors* navrhli dizajn ultra veľkého jednodielneho odliatku s jednoduchou opravou zahŕňajúcou aspoň jednu vopred definovanú vymeniteľnú časť integrálne odliateho hlavného telesa [8, 11]. Poškodená vymeniteľná časť by sa z hlavného telesa vyrezala. Vyrezané poškodené vymeniteľné diely môžu byť nahradené náhradným dielom, ktorý má rovnakú geometriu, rozmery a mechanické vlastnosti ako nepoškodená vymeniteľná časť. Náhradná časť môže byť pripojená k hlavnej časti napr. skrutkovaním alebo zvaráním.

Udržateľnosť súvisí so znížením hmotnosti vozidiel a tým môže pomôcť znížiť emisie CO_2 počas jeho prevádzkového životného cyklu. Tento prístup však môže výrazne zvýšiť skleníkové plyny zvýšením výroby primárnej hliníkových zliatin pre *giga* odliatky. Použitie recyklovaných hliníkových zliatin namiesto primárnych môže viesť k cca 90 % zníženiu emisií CO_2 .

3 SÚHRN POZNATKOV

Niektoré fakty o *giga castingu*:

- výroba odliatku zvyčajne trvá približne dve minúty,

- výrobca vozidiel, ktorého cieľom je ročná produkcia 500-tisíc batériových elektrických vozidiel, ktoré zahŕňajú diely pre zadnú časť auta, by potreboval štyri až päť *giga* lisov,
- ročná produkcia týchto komponentov môže predstavovať približne 120-tisíc dielov v závislosti od veľkosti závodov,
- dizajnové aspekty tlakového liatia: hrúbka steny: 2 mm ÷ 5 mm, čo umožňuje optimálne stuhnutie a pevnosť,
- výber zliatin pre *giga* odliatky s dôrazom na proces bez tepelného spracovania,
- mechanické vlastnosti: $R_m = 200$ MPa, $R_{p0.2} = 135$ MPa, $A = 8$ %,
- manažment vyrovnávania mega odliatkov,
- možnosti merania a pod.

ZÁVER

Ultra veľké hliníkové odliatky poskytli nové trendy v automobilovom priemysle, a môžu spôsobiť revolúciu v návrhoch a výrobe konštrukcie karosérie vozidiel. V súčasnosti sa tieto odliatky používajú hlavne na odliatky spodnej konštrukcie karosérie. Nahradia desiatky a stovky malých súčiastok vyrábaných lisovaním, odlievaním a pod. Odstránia sa procesy zvárania, čo zjednoduší výrobu; zníži sa hmotnosť ultra veľkých odliatkov oproti štruktúrnym odliatkom a predpokladá sa úspora nákladov.

Napriek mnohým lákavým výhodám, aplikácia ultra veľkých odliatkov predstavuje určité problémy, ako napr. dosiahnutie kvality odliatkov a rozmerových tolerancií v celom odliatku, použiteľnosť a udržateľnosť materiálov. Opraviteľnosťou možno zlepšiť udržateľnosť ultra veľkých hliníkových odliatkov prostredníctvom prijatia návrhu koncepcie opravy a použitia udržateľných (recyklovaných) hliníkových zliatin. Kvalitu týchto odliatkov a mechanické vlastnosti možno pozitívne upraviť optimálnou konštrukciou vtokového systému a optimalizáciou procesu odlievania pomocou nástrojov virtuálneho odlievania [1].

Napriek týmto pokrokom, niektorí kritici vyjadrujú obavy z možných problémov s kvalitou a flexibilitou súvisiacimi s touto metódou. Keďže však priemysel zápasí s udržaním ziskovosti pri rastúcich nákladoch na suroviny, čoraz viac sa spolieha na takéto inovatívne riešenia [2].

Záverom možno konštatovať, že *giga casting* je viac než len výrobná metóda, predstavuje transformačný prístup, ktorý rieši viacero výziev v automobilovom priemysle. Umožňuje spoločnostiam vyrábať vozidlá, ktoré sú nielen štruktúrne lepšie a ľahšie, ale aj esteticky odlišnejšie a šetrnejšie k životnému prostrediu. S neustálym vývojom tejto technológie bude hrať kľúčovú úlohu pri formovaní budúcnosti automobilového dizajnu a výroby.

Pod'akovanie

Tento článok bol vytvorený s podporou projektu KEGA 003ŽU-4/2024.

LITERATÚRA

- [1] WANG, Q.-G. - WANG, A. - CORYELL, J. (2024): *Advanced Materials Technology & Virtualization*. GM Global Technical Center, Warren, MI USA, China Foundry, N.5, s. 397-408.
- [2] DUCKER FRONTIER (2020): *North America light vehicle aluminum content and outlook*. In: Final Report Summary: July.
- [3] FARSHID HESAMI: <https://www.linkedin.com/pulse/giga-casting-presses-automotive-industry-farshid-hesami-jmumf/>
- [4] HARTLIEB, A - HARTLIEB, M. (2023): *The impact of giga-castings on car manufacturing and aluminum content*. <https://www.lightmetallage.com/news/industry-news/automotive/the-impact-of-giga-castings-on-car-manufacturing-and-aluminum-content>, July 10.
- [5] HARDIGREE, M. (2023): *How Tesla made 'gigacasting', the most important word in the car industry*. <https://www.theautopian.com/how-tesla-made-gigacasting-the-most-important-word-in-the-car-industry>, Sept. 14.
- [6] ABRAHAM, A. K. (2023): *Automotive materials in an evolving landscape*. Ducker Carlisle, January 24.
- [7] MIHALASCU, D.(2022): *Cadillac takes a page from Tesla's book, uses mega castings on Celestiq*. <https://insideevs.com/news/617108/cadillactakes-page-from-tesla-book-uses-mega-castings-on-celestiq>, October 18.
- [8] GAO, Y. - LIAO, H. - SUO, X. (2019): *Prediction of fluidity of casting aluminum alloys using artificial neural network*. In: Proceedings of Materials Science & Technology (MS&T 2019), Sept. 29-Oct. 3, Portland USA.
- [9] ZHAN, H. - ZENG, G. - WANG, Q. et al. (2023): *Unified cast (UniCast) aluminum alloy - Resolving sustainability paradox material solution for vehicle lightweighting*. In: Journal of Materials Science & Technology, Vol. 154, pp. 251-268.
- [10] SCHUH, G. - BERGWELER, G. - DWOROG, L. et al. (2022): *Opportunities and risks of megacasting in automotive production – The aluminum die-cast body in white*. Düsseldorf: VDI Fachmedien, www.researchgate.net/publication/363880399, September.
- [11] WILSON, D. J. - WANG, L. - WANG, Q. et al. (2023): *Repair ultra-large casting*. US Patent Application, No.: 20230356293.