



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-19-0559

Modifikácia povrchu vybraných kovových materiálov počas elektro-hydro-dynamického módu elektrolytno-plazmovej technológie

Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Marcela Pokusová, CSc.**

Príjemca

Slovenská technická univerzita v Bratislave - Strojnícka fakulta

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Strojnícka fakulta
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie
Centrum 3D tisku "Protolab"
Fakulta strojí
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 2172/15
708 00 Ostrava - Poruba
Česká republika

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

1. Šooš, Ľ., Pokusová, M., Blecha, P., Matúš, M., Ondruška, J., Čačko, V., Bábics, J. (STU Bratislava). Spôsob vysokoúčinnnej dekompozície vrstvených odpadových skiel a stavebnicová linka : patentový spis č. 288900, oznámenie o udelení patentu 13.10.2021. Banská Bystrica. Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky 2021. 14 s.
2. Šooš, Ľ., Zemková, E., Pokusová, M., Ferencz, V., Šooš, M. (STU Bratislava). Smart multifunkčný kĺb : patentový spis č. 288964, oznámenie o udelení patentu 11.05.2022, Banská Bystrica, Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky, 2022. 13 s.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

1. Vencel, A., Šljivić, V., Pokusová, M. et al. Production, Microstructure and Tribological Properties of Zn-Al/Ti Metal-Metal Composites Reinforced with Alumina Nanoparticles. Inter Metalcast, 15, 2021, s. 1402–1411 (Q2 – JCR)
2. Šabík, V., Futáš, P., Pribulová, A. Failure analysis of a clutch wheel for wind turbines with the use of casting process simulation. In Engineering Failure Analysis, Vol. 135, 2022, 106159, ISSN 1350-6307.
3. Futáš, P., Pribulová, A. et al. Metallurgical Quality of Cast Iron Made from Steel Scrap and Possibilities of Its Improvement. In Metals, 2023, Vol. 13, Iss. 1, 27.
4. Šabík V., Futáš, P., Pribulová, A., Delimanová P. Optimization of a Gating System by Means of Simulation Software to Eliminate Cold Shut Defects in Casting. Journal of Casting & Materials Engineering, Vol. 5, No. 1, 2021, s. 1-4.

5. Šooš, Ľ., Pokusová, M., Matúš, M. et al. Design of a modular technological line for the recycling of laminated car glass. In Analysis of the state, forecasts and new technologies of waste recovery in the automotive industry. 1. vyd. Ludenscheid : RAM-Verlag, 2021, s. 68-91. ISBN 978-3-96595-008-5.
6. Hanko, L., Križan, P., Bábits, J. Design of experiment (DOE) for robotic machining operation. In International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), 2022, Vol. 4, Iss. 1, p. 267- 277
7. Pokusová, M., Gabrišová, Z., Morávek, I. Využitie elektrolytno-plazmovej technológie ako dokončovacej operácie objektov vyrobených aditívnou technológiou SLM. In Vývoj výrobných systémov a technológií. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 247 - 256. ISBN 978-80-227-5157-5.
8. Pokusová, M., Morávek, I., Lach, J., Blizňák, M. Elektrolytno-plazmové leštenie nízkoaliovaného ocele 16MnCrS5. In: Vývoj výrobných systémov a technológií 2022. Bratislava: SPEKTRUM STU, 2022, s. 38-45. ISBN 978-80-227-5247-3
9. Pokusová, M., Gabrišová, Z., Šooš, Ľ., Lach, J. Úprava povrchu objektov vyrobených postupmi aditívnej výroby elektrolytno-plazmovým leštením. In: Vývoj výrobných systémov a technológií 2022. Bratislava: SPEKTRUM STU, 2022, s. 46-55. ISBN 978-80-227-5247-3
10. Futáš, P., Pribulová, A., Pokusová, M., Junaková, A., Šabík, V. Possibilities of austempered ductile iron (ADI) production. In SGEM 2022. 22th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume – Mineral Processing: conference proceedings. Sofia: STEF 92 Technology, Bulgaria, 2022, Vol. 22, Iss. 1.1. DOI:10.5593/sgem2022/L1/s04.056
11. Futáš, P., Šabík, V. et al. Computer simulation use in design gating system of cast made from the cast iron. In SGEM 2022. 22th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume – Mineral Processing: conference proceedings. Sofia: STEF 92 Technology, Bulgaria, 2022, Vol. 22, Iss. 2.1. DOI:10.5593/sgem2022/2T/s07.01

Uplatnenie výsledkov projektu

V rámci riešenia projektu APVV-19-0559 bol navrhnutý, skonštruovaný a otestovaný prototyp zariadenia elektrolytnej plazmy na modifikáciu kovových povrchov s výkonom 17 kW/50 A s prestaviteľným výstupným jednosmerným napätím v rozsahu 220 – 315 V, ktoré umožňuje modifikovať kovový povrch s plochou do 4 dm². Zariadenie pozostáva z pracovnej nádoby s upínacím zariadením upravovaného objektu (aktívna elektróda) a výkonovej jednotky – externého prúdového zdroja s riadiacou jednotkou. Konceptia konštrukcie umožňuje, aby zariadenie pracovalo v anódovom aj katódovom režime zapojenia. Objem pracovnej nádoby z antikorozynej ocele a systém chladenia elektrolytu sú dimenzované na obeh približne 60 – 300 l elektrolytu. V sledovanom období bol pre zariadenie ELP pripravený ďalší externý prúdový zdroj, ktorý je navrhnutý tak, aby bol pripojiteľný do siete 3 x 400/230V, 63A, 40kW. V rámci riešenia projektu bol navrhnutý a zrealizovaný inovatívny funkčný prototyp závesnej jednotky pre rotáciu súčiastok, ktorých tvar vyžaduje, aby počas procesu ELP rotovali v elektrolyte.

Bol vyvinutý a overený viacstupňový proces elektrolytno-plazmovej technológie na úpravu povrchov dielov vyrobených z nízkoaliovaných ocelí, pri ktorom sa aplikujú dva rôzne elektrolyty. Možnosti procesu boli overené na súčiastkach z nízkoaliovaného mangán-chrómovej oceli 16MnCrS5 v stave po cemenovaní a kalení (51 HRC), ktoré sú určené pre prácu v hydraulických systémoch. V prvom stupni sa elektrolytom na báze síranu a chloridu amónneho vyvinutom pre uhlíkové ocele znižuje drsnosť povrchu, kedy je možné východiskovú drsnosť Ra 0,2 - 0,4 µm znížiť v priemere o 50% za 120 sekúnd. V druhom stupni sa elektrolytom na báze uhličitanov povrch upravuje na zrkadlový lesk, pričom výsledná drsnosť povrchu Ra dosiahne hodnotu pod 0,1 µm. Bol preukázaný pozitívny vplyv procesu ELP na modifikáciu povrchu dielov po klasickom obrábaní. Povrch materiálu vo východiskovom stave jemnom brúsení vykazoval nielen zreteľne viditeľné stopy po nástroji, ale aj ďalšie makronerovnosti povrchu, ktoré narúšajú integritu povrchu. Na povrchu ocele po prvom stupni ELP v elektrolyte s pracovnou teplotou 80°C s výdržou 60 sekúnd neboli viditeľné stopy po obrábaní a povrch vykazoval zvýšenú odolnosť voči korózii.

Bol overený proces elektrolytno-plazmovej technológie na zníženie drsnosti a zlepšenie homogenity povrchu dielov vyrobených aditívnou technológiou Selective Laser Melting. Možnosti procesu boli overené na objektoch z austenitickej nehrdzavejúcej ocele AISI 316L bežne používanej v medicínskych implantátoch s priemernou drsnosťou Ra v stave po

vytlačení v intervale 7 – 15 μm . Aplikácia procesu so 4% elektrolytom na báze síranu amónneho s teplotou 80°C znížila priemernú drsnosť Ra za 15 minút o 82%, t. j. z 10 μm na 1,8 μm , pričom dôsledkom odstránenia povrchových chýb sa zlepšila homogenita povrchu, došlo k jeho vyhladeniu a povrch vykazoval strieborný lesk. Aplikácia procesu so 6% elektrolytom s pracovnou teplotou 80°C znížila priemernú východiskovú drsnosť Ra za 15 minút o 74%, t. j. z 10 μm na 2 μm . Vplyv ELP na zvýšenie čistoty povrchu dielov vyrobených aditívnymi technológiami z kovových práškov bol sledovaný prostredníctvom zmeny chemického zloženia povrchovej vrstvy. EDS analýza ukázala, že z povrchu vystaveného procesu elektrolytnej plazmy v anódovom režime po dobu 30 - 60 sekúnd bola odstránená primárna oxidická vrstva, čomu zodpovedá aj zmena vzhľadu povrchu na výrazne lesklý kovovo sivý a pokles obsahu O₂ z 2,1 hm.% na 0,5 hm.%.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

V rámci riešenia projektu APVV-19-0559 bol navrhnutý, skonštruovaný a otestovaný prototyp zariadenia elektrolytnej plazmy na modifikáciu kovových povrchov s výkonom 17 kW/50 A s prestaviteľným výstupným jednosmerným napätím v rozsahu 220 – 315 V, ktoré umožňuje modifikovať kovový povrch s plochou do 4 dm². Zariadenie pozostáva z pracovnej nádoby s upínacím zariadením upravovaného objektu (aktívna elektróda) a výkonovej jednotky – externého prúdového zdroja s riadiacou jednotkou. Konceptia konštrukcie umožňuje, aby zariadenie pracovalo v anódovom aj katódovom režime zapojenia. Objem pracovnej nádoby z antikorozynej ocele a systém chladenia elektrolytu sú dimenzované na obeh približne 60 – 300 l elektrolytu. V sledovanom období bol pre zariadenie ELP pripravený ďalší externý prúdový zdroj, ktorý je navrhnutý tak, aby bol pripojiteľný do siete 3 x 400/230V, 63A, 40kW. V rámci riešenia projektu bol navrhnutý a zrealizovaný inovatívny funkčný prototyp závesnej jednotky pre rotáciu súčiastok, ktorých tvar vyžaduje, aby počas procesu ELP rotovali v elektrolyte. Modul závesnej jednotky s rotáciou pozostávajúci zo základnej dosky, motora, komutátorovej časti, ozubených kolies a držiaka je riešený ako úplne odnímateľná časť konštrukcie zariadenia. Mechanizmus umožňuje regulovateľnú rotáciu v oboch smeroch s maximálnou rýchlosťou 40 ot.min⁻¹ pri hĺbke ponoru držiaka 70 - 150 mm. Počet súčiastok umiestnených na držiaku je definovaný súčtom ich plôch a výkonom zariadenia ELP (4 dm²). Zariadenie je umiestnené v Laboratóriu elektrolytnej plazmy na pracovisku riešiteľa – SjF STU v Bratislave. Bol vyvinutý a overený viacstupňový proces elektrolytno-plazmovej technológie na úpravu povrchov dielov vyrobených z nízkolegovaných ocelí, pri ktorom sa aplikujú dva rôzne elektrolyty. Možnosti procesu boli overené na súčiastkach z nízkolegovanej mangán-chrómovej oceli 16MnCrS5 v stave po cemenovaní a kalení (51 HRC), ktoré sú určené pre prácu v hydraulických systémoch. V prvom stupni sa elektrolytom na báze síranu a chloridu amónneho vyvinutom pre uhlíkové ocele znižuje drsnosť povrchu, kedy je možné východiskovú drsnosť Ra 0,2 - 0,4 μm znížiť v priemere o 50% za 120 sekúnd. V druhom stupni sa elektrolytom na báze uhličitanov povrch upravuje na zrkadlový lesk, pričom výsledná drsnosť povrchu Ra dosiahne hodnotu pod 0,1 μm . Pri procese ELP sa prúdová hustota pohybuje v intervale 0,1 - 0,2 A/cm² pri pracovnom napätí 260 - 270 V a priemernej hodnote jednosmerného prúdu 6,5 A. Bol preukázaný aj pozitívny vplyv procesu ELP na modifikáciu povrchu dielov po klasickom obrábaní. Povrch materiálu vo východiskovom stave jemnom brúsení vykazoval nielen zreteľne viditeľné stopy po nástroji, ale aj ďalšie makronerovnosti povrchu, ktoré narúšajú integritu povrchu. Na povrchu ocele po prvom stupni ELP v elektrolyte s pracovnou teplotou 80°C s výdržou 60 sekúnd neboli viditeľné stopy po obrábaní a povrch sa javil ako homogénny so zvýšenou odolnosťou voči korózii. Bol overený proces elektrolytno-plazmovej technológie na zníženie drsnosti a zlepšenie homogenity povrchu dielov vyrobených aditívnou technológiou Selective Laser Melting. Možnosti procesu boli overené na objektoch z austenitickej nehrdzavejúcej ocele AISI 316L bežne používanej v medicínskych implantátoch s priemernou drsnosťou Ra v stave po vytlačení v intervale 7 – 15 μm . Aplikácia procesu so 4% elektrolytom na báze síranu amónneho s teplotou 80°C znížila priemernú drsnosť Ra za 15 minút o 82%, t. j. z 10 μm na 1,8 μm , pričom dôsledkom odstránenia povrchových chýb sa zlepšila homogenita povrchu, došlo k jeho vyhladeniu a povrch vykazoval strieborný lesk. Aplikácia procesu so 6% elektrolytom s pracovnou teplotou 80°C znížila priemernú východiskovú drsnosť Ra za 15 minút o 74%, t. j. z 10 μm na 2 μm . Pri procese ELP prúdová hustota dosiahla hodnotu 0,45

– 0,55 A/cm² pri pracovnom napätí 260-275 V. Vplyv ELP na zvýšenie čistoty povrchu dielov vyrobených aditívnymi technológiami z kovových práškov bol sledovaný prostredníctvom zmeny chemického zloženia povrchovej vrstvy. EDS analýza ukázala, že z povrchu vystaveného procesu elektrolytickej plazmy v anódovom režime po dobu 30 - 60 sekúnd bola odstránená primárna oxidická vrstva, čomu zodpovedá aj zmena vzhľadu povrchu na výrazne lesklý kovovo sivý a pokles obsahu O₂ z 2,1 hm.% na 0,5 hm.%. Proces bol testovaný na zariadení ELP 6 kW/20 A navrhnutom a skonštruovanom na pracovisku riešiteľa – SjF STU v Bratislave.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

A prototype of an electrolytic plasma (ELP) device for the modification of metal surfaces with a power of 17 kW/50 A with an adjustable output DC voltage in the range of 220 - 315 V was designed, constructed and tested that can modify a metal surface with an area of up to 4 dm². The device consists of a working vessel with a clamping device for the treated object (active electrode) and a power unit - an external current source with a control unit. The power unit design allows the device to work in both anode and cathode connection modes. The volume of the stainless steel working vessel and the electrolyte cooling system are designed for the circulation of app. 60 - 300 litres of electrolyte. In the monitored period, another external current source was prepared for the ELP device, which is designed to be connectable to the network of 3 x 400/230V, 63A, 40kW. As part of the project solution, an innovative functional prototype of a hanging unit for rotating the parts that shape requires them to rotate in the electrolyte during the ELP process was designed and implemented. The module of the hanging unit with rotation, consisting of the baseplate, the motor, the commutator part, the gears and the holder, is designed as a completely removable part of the device structure. The mechanism enables the adjustable rotation in both directions with a maximum speed of 40 rev.min⁻¹ at an immersion holder depth of 70 - 150 mm. The number of parts placed on the holder is defined by the power supply of the ELP device and the whole metal area that is in a contact with an electrolyte under the ELP process (4 dm²). The device is located in the Electrolyte Plasma Laboratory at the researcher's workplace - SjF STU in Bratislava.

A multi-stage process of electrolytic plasma technology has been developed and verified for the surface treatment of parts made of low-alloy steels, in which two different electrolytes are applied. Capabilities of the ELP process were verified on parts made of low-alloy manganese-chromium steel 16MnCrS5 after case-hardening (51 HRC) that are intended for working in the hydraulic systems. In the first stage, the surface roughness is reduced using an electrolyte based on ammonium sulphate and chloride developed for carbon steels. Here, the initial roughness Ra of 0.2 - 0.4 µm could be reduced by an average of 50% in 120 seconds. In the second stage, under a carbonate-based electrolyte the surface is treated to a mirror shine, when the finish surface roughness Ra falls below 0.1 µm. During the ELP process, the current density is ranging from 0.1 to 0.2 A/cm² at a working voltage of 260 - 270 V and an average direct current value of 6.5 A. The positive effect of the ELP process on the surface of parts after classical machining has also been proven. The surface of the material after the fine grinding showed not only clearly visible traces caused by the tool, but also other surface macro-unevenness that disrupt the surface integrity. After the first stage of ELP when an electrolyte with a working temperature of 80°C and the process duration of 60 seconds was applied, no traces of machining were visible on the steel surface, and it appeared homogeneous with increased resistance to corrosion.

Electrolyte-plasma technology process has been proven to reduce a roughness and improve a surface homogeneity of parts produced by the selective laser melting additive technology. The capabilities of the process were verified on objects made of austenitic stainless steel AISI 316L that is commonly used in medical implants. The as-printed state parts had an average roughness Ra in the range of 7-15 µm. The application of the ELP process with 4% ammonium sulphate electrolyte with a working temperature of 80°C reduced the average roughness Ra by 82% in 15 minutes, i.e. from 10 µm to 1.8 µm, when as a result of the surface defects removal, the surface homogeneity was improved, it became even and showed a silver gloss. The application of the process with 6% electrolyte and a working temperature of 80°C reduced the average initial roughness Ra by 74% in 15 minutes, i.e. from 10 µm to 2 µm. During the ELP process, the current density was of 0.45 - 0.55 A/cm²

at a working voltage of 260 - 275 V. The ELP effect on improvement in the surface cleanliness of parts produced by additive technologies from metal powders was monitored through the chemical composition of the surface layer. The EDS analysis showed that the primary oxide layer was removed from the surface that was exposed to the ELP process in the anode mode for 30 - 60 seconds that resulted in a change in the surface appearance to a significantly glossy metallic grey and a decrease in the O₂ content from 2.1 wt.% to 0.5 wt.%. The process was tested on equipment ELP 6 kW/20 A designed and constructed at the workplace of the researcher - SJF STU in Bratislava.