



# **Analýza plazmy hybridného zvarania v pulznom režime zvaracích zdrojov TIG - laser pomocou vysokorýchlostnej kamery**

Jaroslav Bruncko<sup>1</sup>, Miroslav Michalka<sup>1</sup>, Michal Šimek<sup>2</sup>, Andrej Vincze<sup>1</sup>,  
Rastislav Ormandy<sup>2</sup>, Tomáš Szewczyk<sup>2</sup>, **František Uherek**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Medzinárodné laserové centrum CVTI, Lamačská cesta 8/A, Bratislava

<sup>2</sup>PRVÁ ZVÁRAČSKÁ, a.s., Kopčianska 14, 851 01 Bratislava

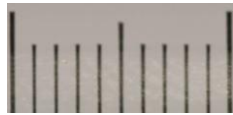
## Obsah - Motivácia

- ❑ Plazma vo zvaracích procesoch – špecifiká pri hybridnom zvaraní
- ❑ Plazma ako významný zdroj informácie o zvaracom procese
- ❑ Hybridné zvaranie v pulznom režime výkonových zdrojov
- ❑ Experimentálna aparátúra a technologické parametre
- ❑ Vizualizácia vysokorýchlostnou kamerou
- ❑ Výsledky – diskusia
- ❑ Záver – východiská pre ďalší výskum

## Plazma vo zväracích procesoch



## Hybridný proces: pulzný TIG + laser



1 cm



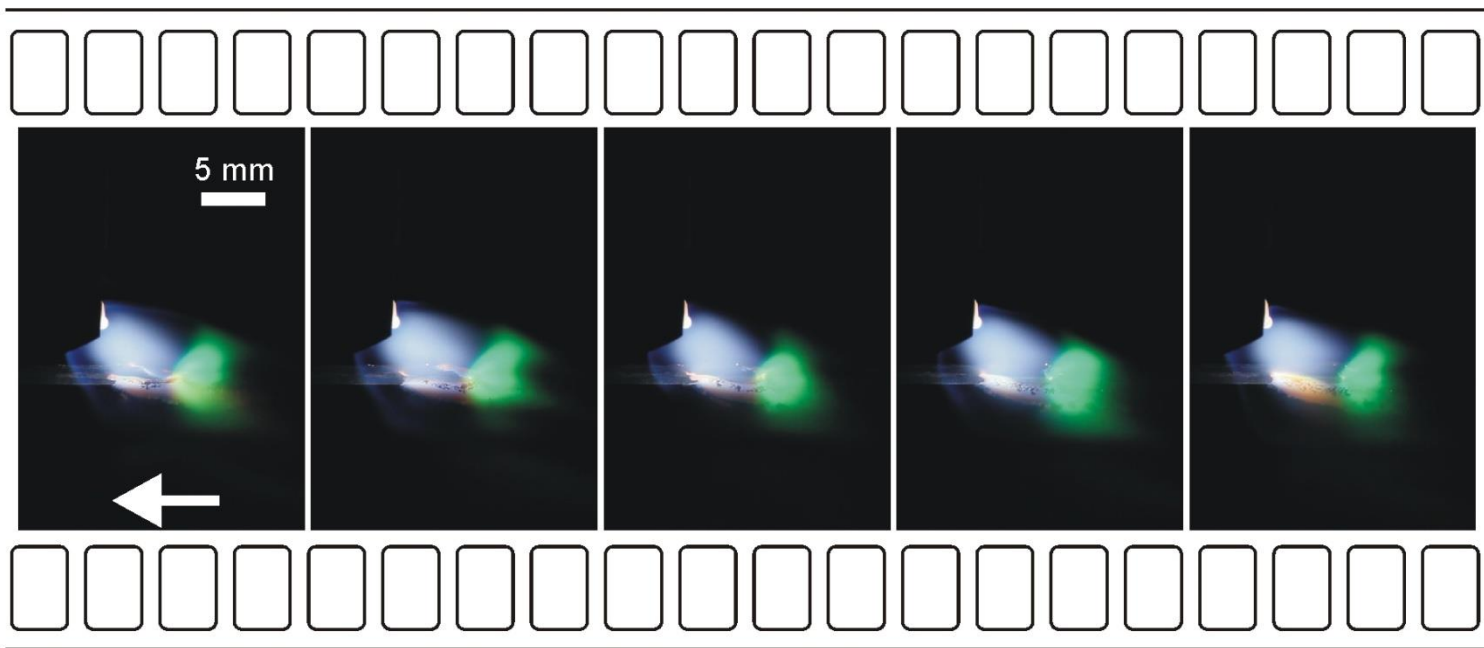
Hybridný (pulzný TIG+laser) proces:

84 A, 100 Hz, 10 mm.s<sup>-1</sup>  
2500 W, fokus +15 mm  
lemový zvar, hliník  
ochr. plyn Ar

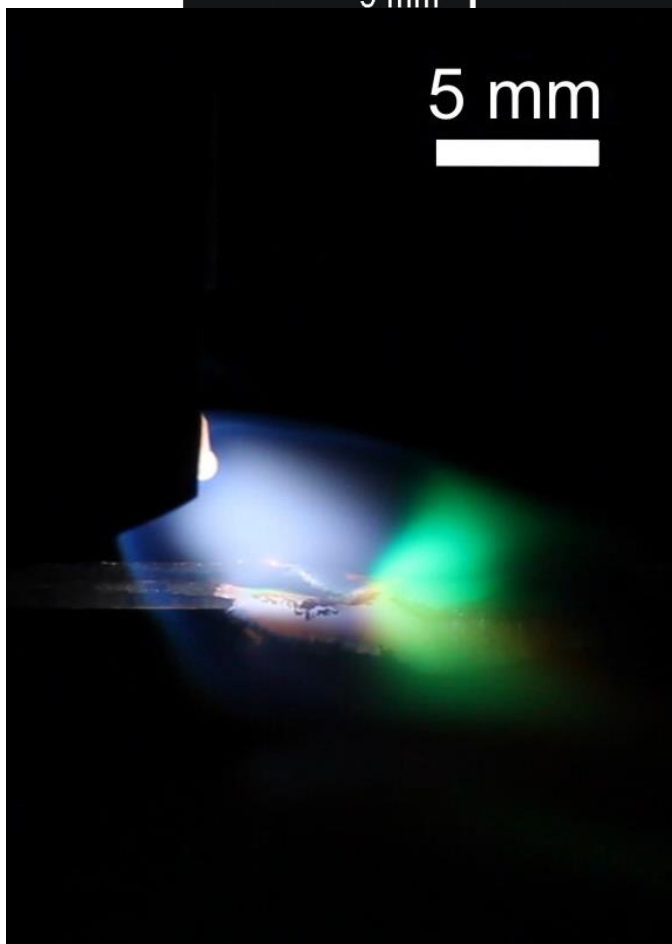
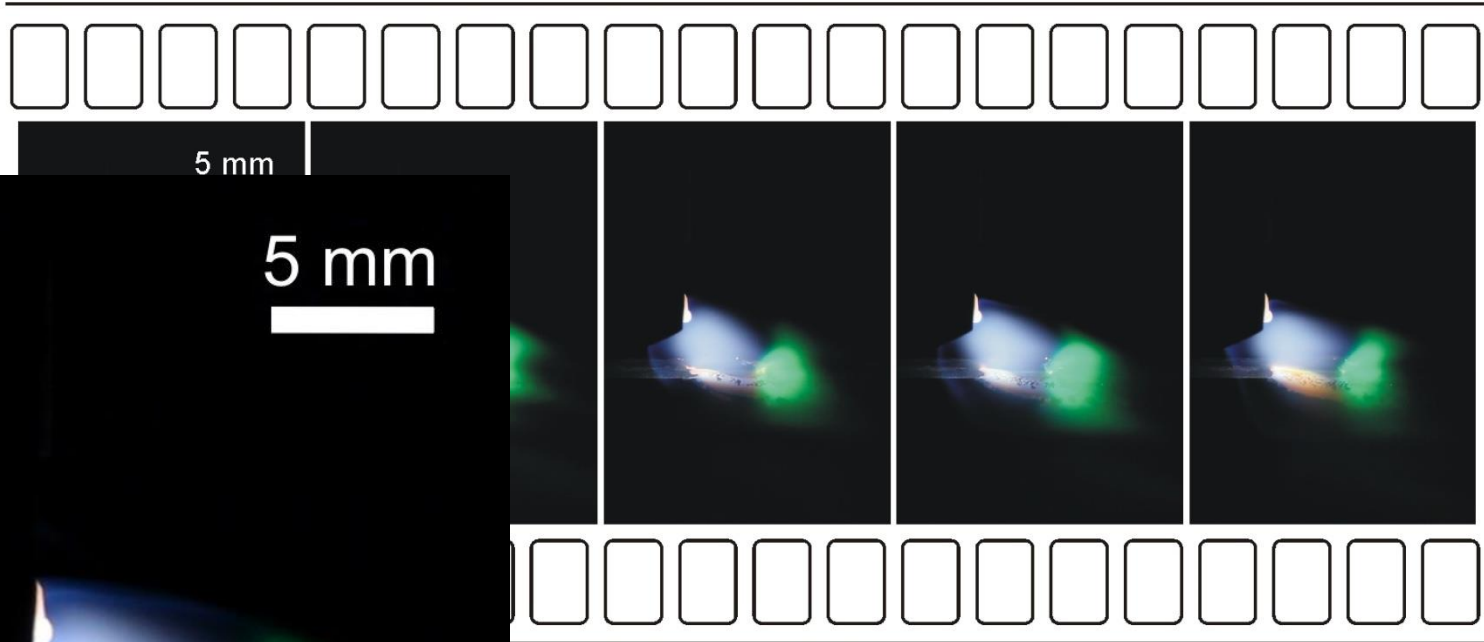
Záznamový režim (MVI\_3239.wmv):  
(vzdialenosť 50 cm)

Full HD 1920x1080 pixelov,  
25 záberov / sek.,  
ISO 500, clona 13, 1/2000 s.,  
filter ND 400.

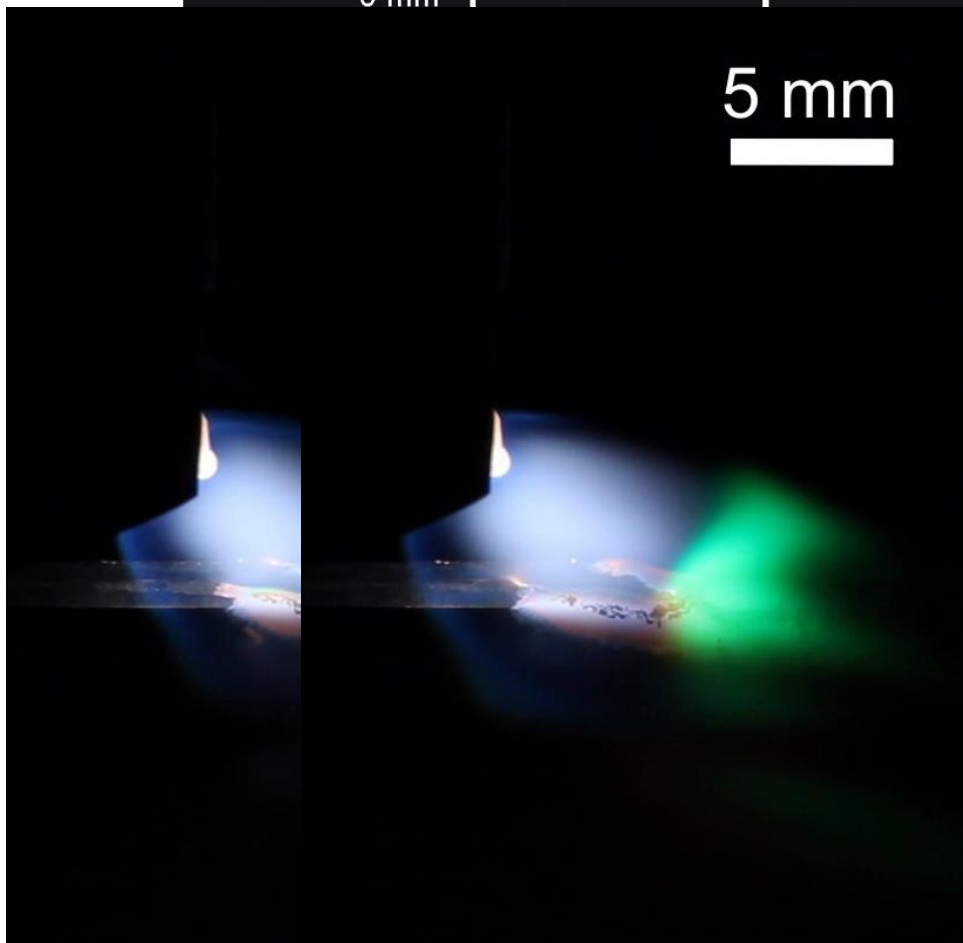
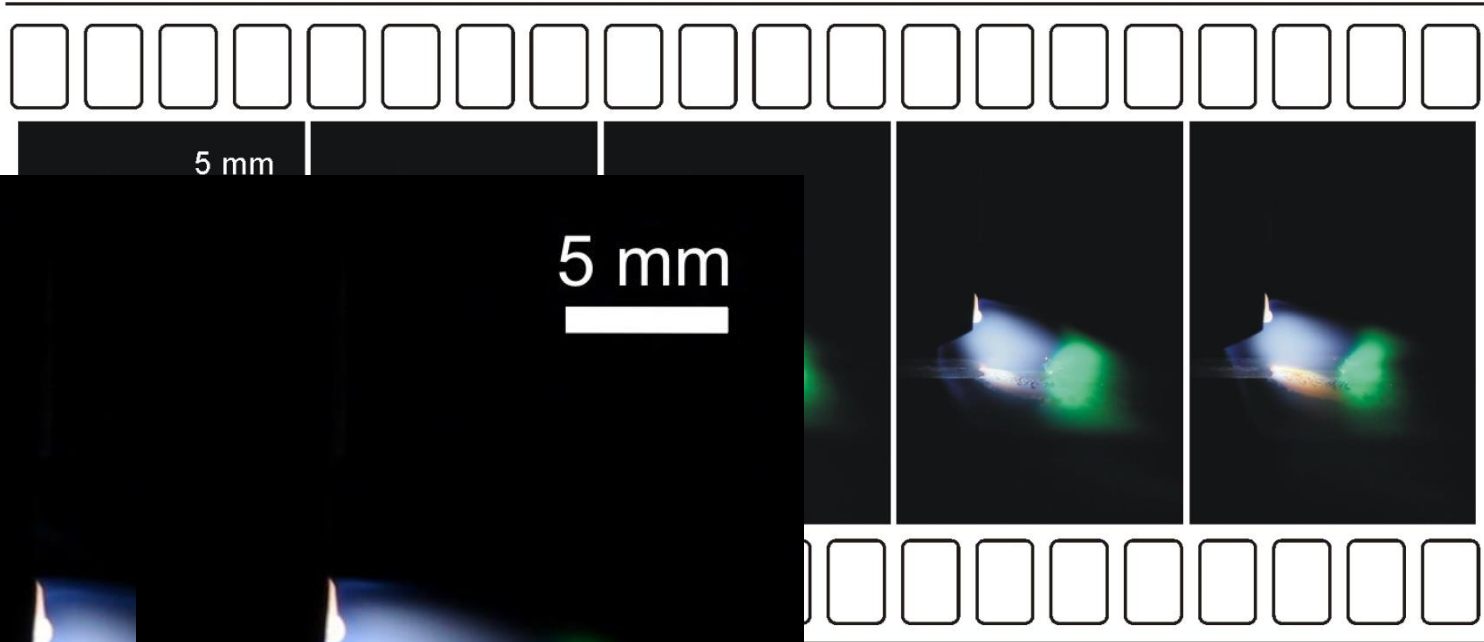
# Hybridný proces: pulzný TIG + laser



# Hybridný proces: pulzný TIG + laser

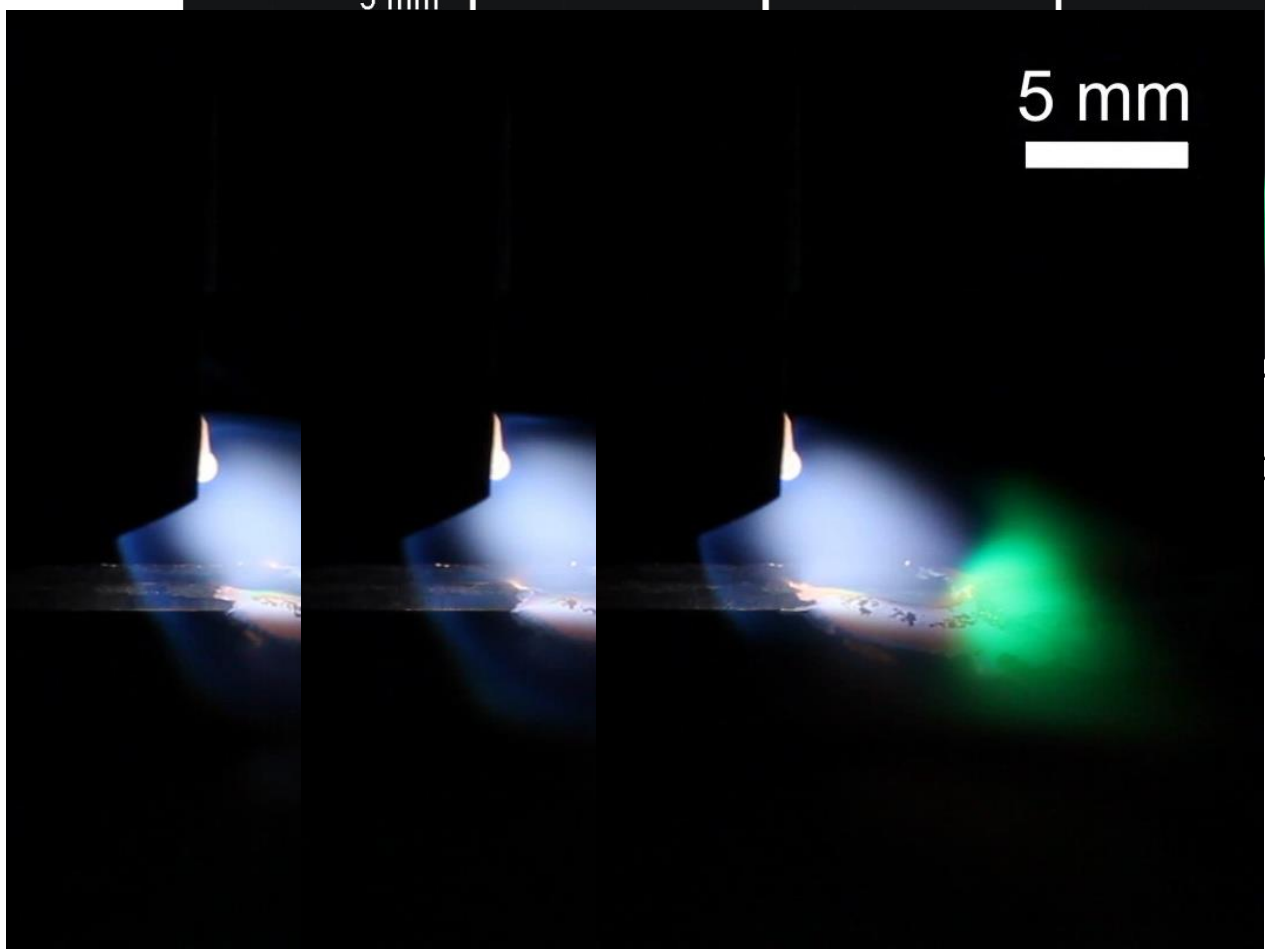
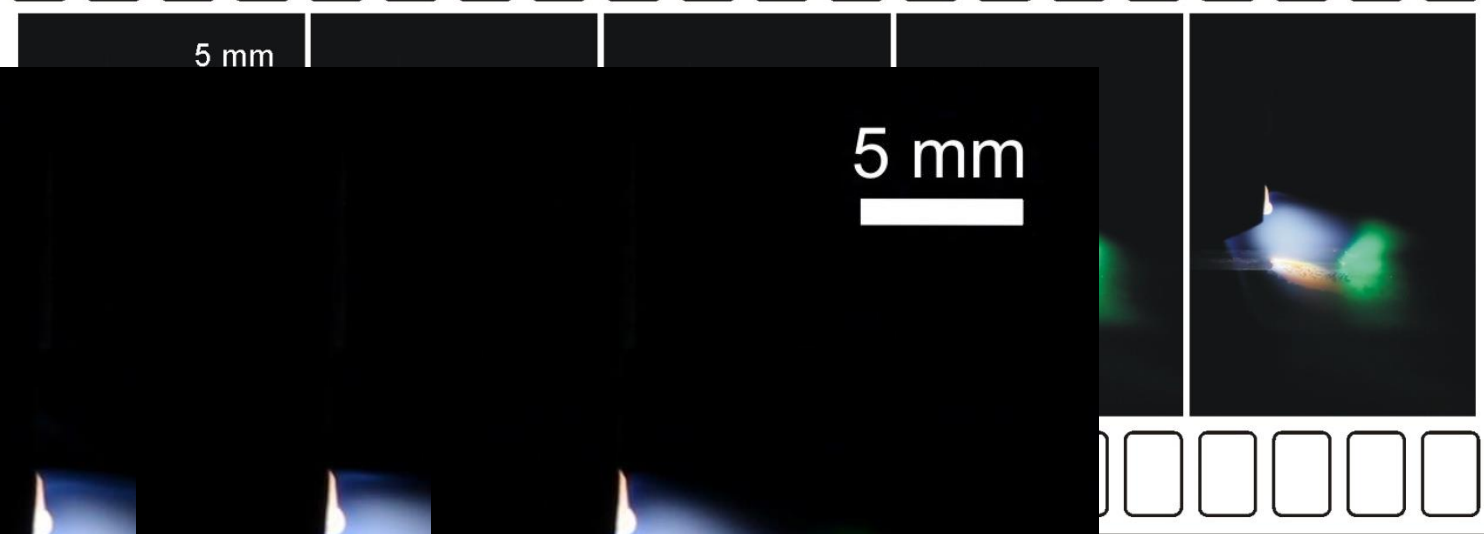


# Hybridný proces: pulzný TIG + laser





# Hybridný proces: pulzný TIG + laser



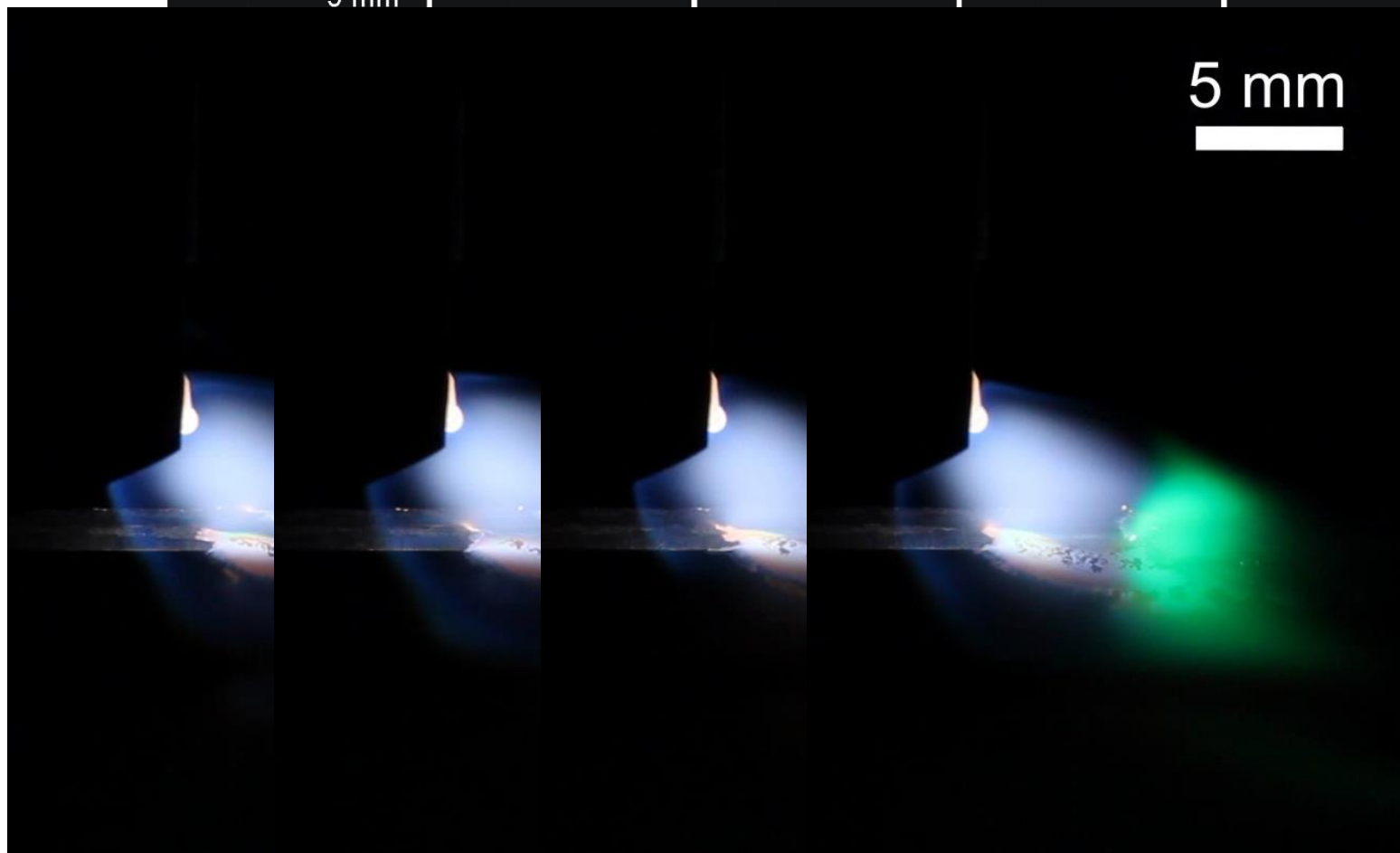


# Hybridný proces: pulzný TIG + laser

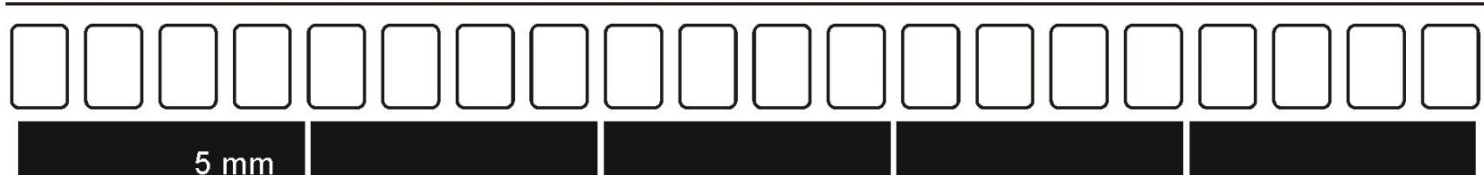


5 mm

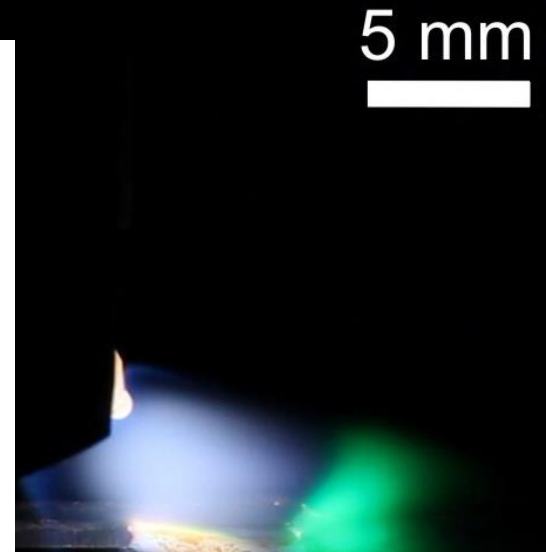
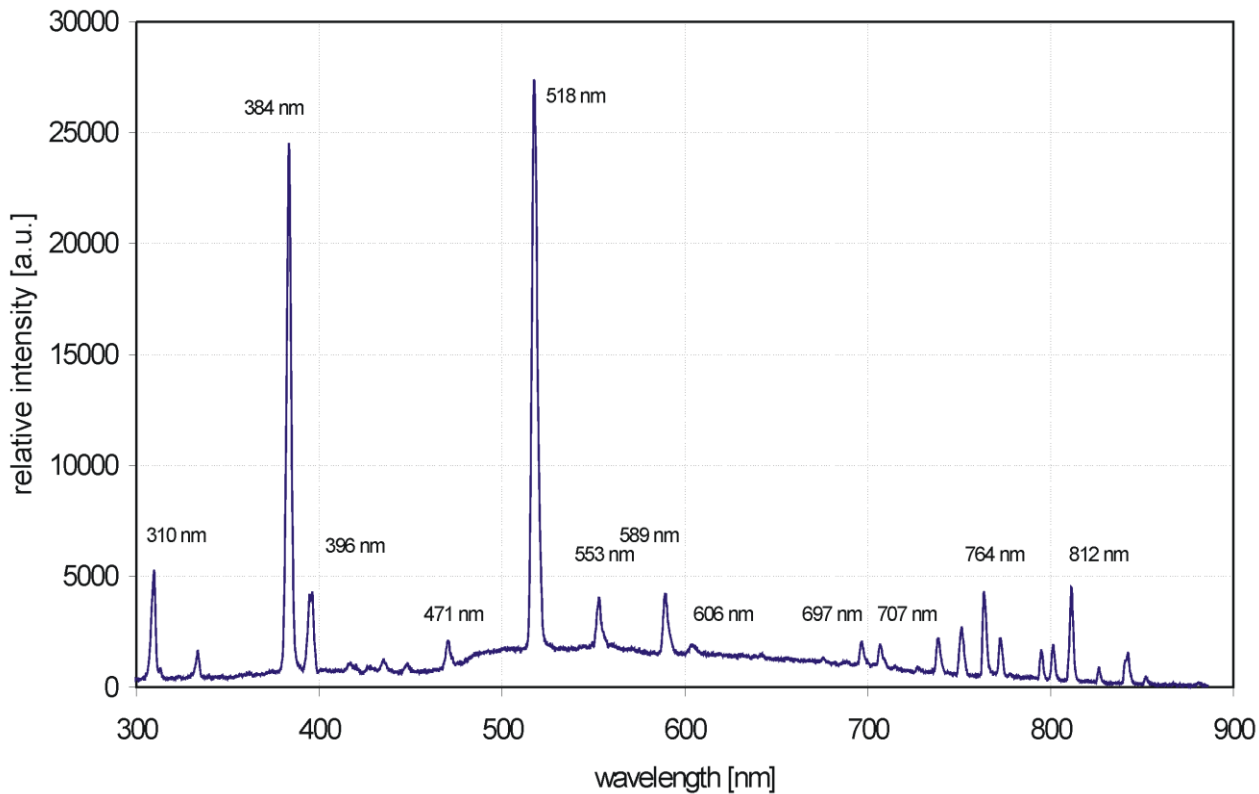
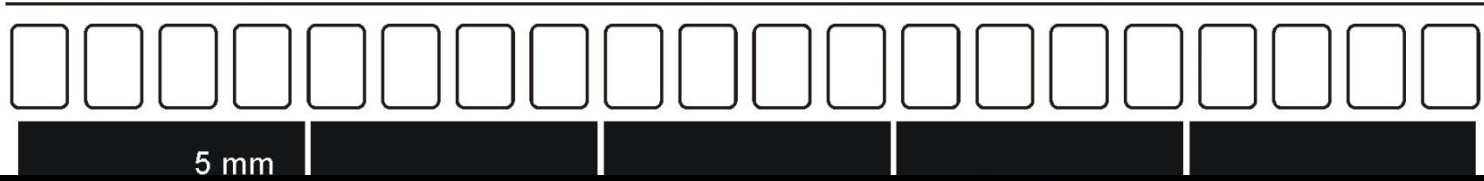
5 mm



# Hybridný proces: pulzný TIG + laser



# Hybridný proces: pulzný TIG + laser

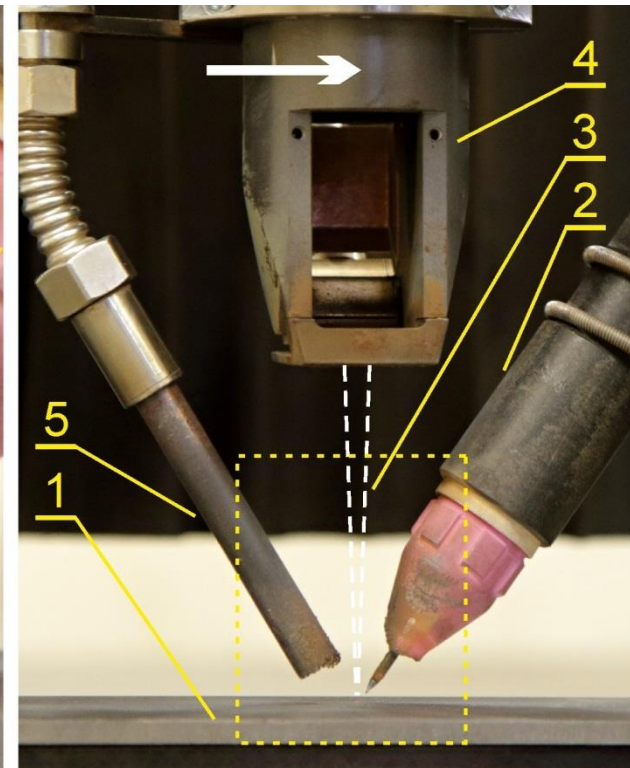
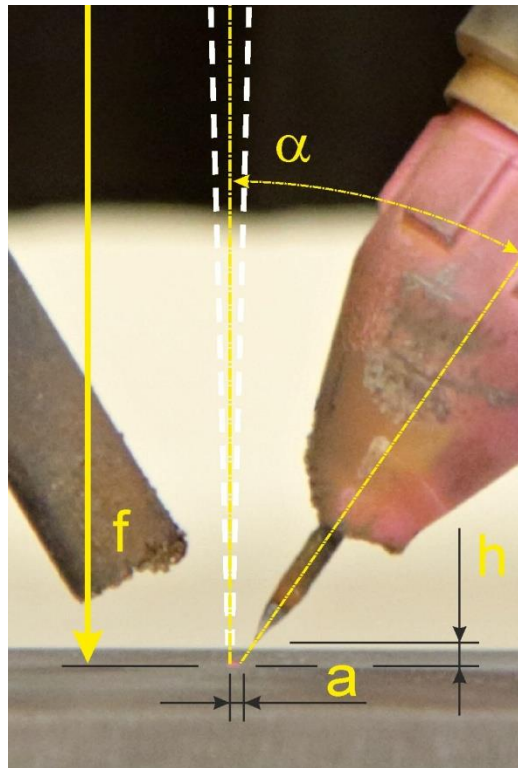


## Experimentálne podmienky a zväracie parametre

Experimentálny výskum prebiehal s využitím improvizovaného zväracieho pracoviska pre hybridné zváranie v kombinácii TIG–laser v Prvej zväračskej, a.s.

- 1 – zváraný materiál
  - 2 – TIG horák
  - 3 – laserový zväzok
  - 4 – laserová výstupná optika
  - 5 – prívod ochranného plynu
- f – poloha ohniska voči materiálu  
a – odstup osi TIG elektródy  
h – výška hrotu TIG elektródy  
 $\alpha$  – uhol sklonu TIG horáka)

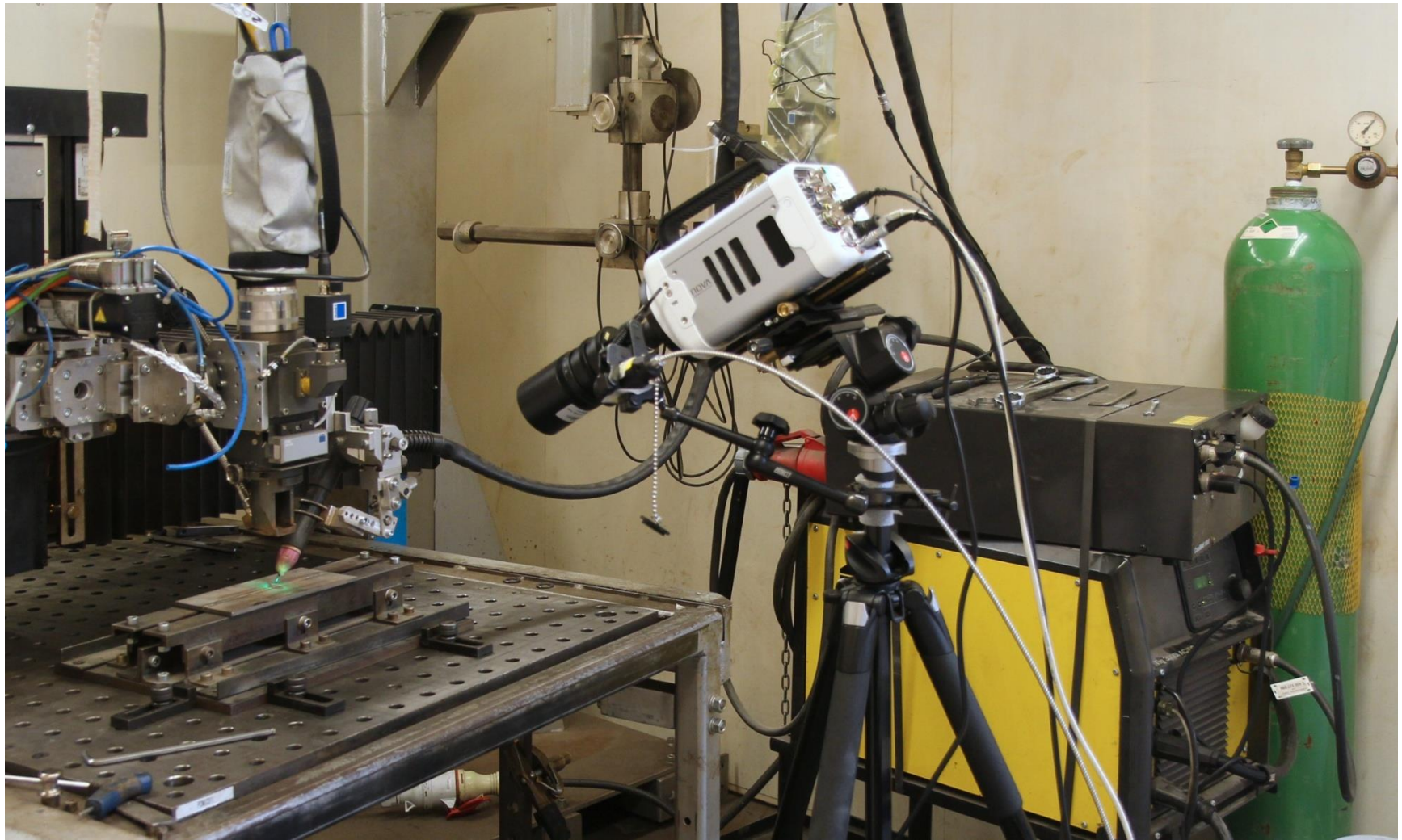
Materiál: duplexná oceľ  
EN 1.4462, hrúbka 5 mm



Pracovisko hybridného zvárania v kombinácii TIG – laser

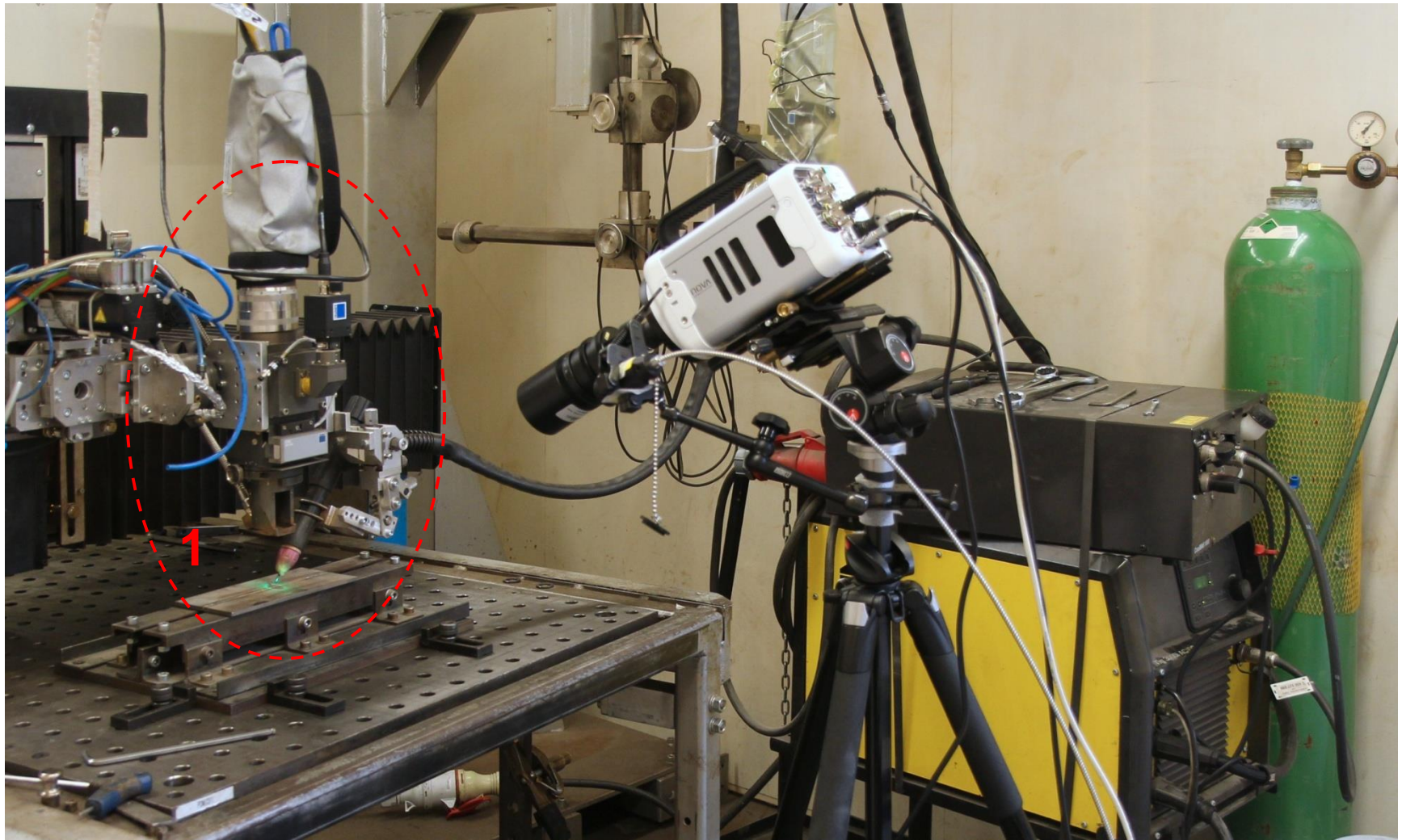


## Experimentálna aparatúra



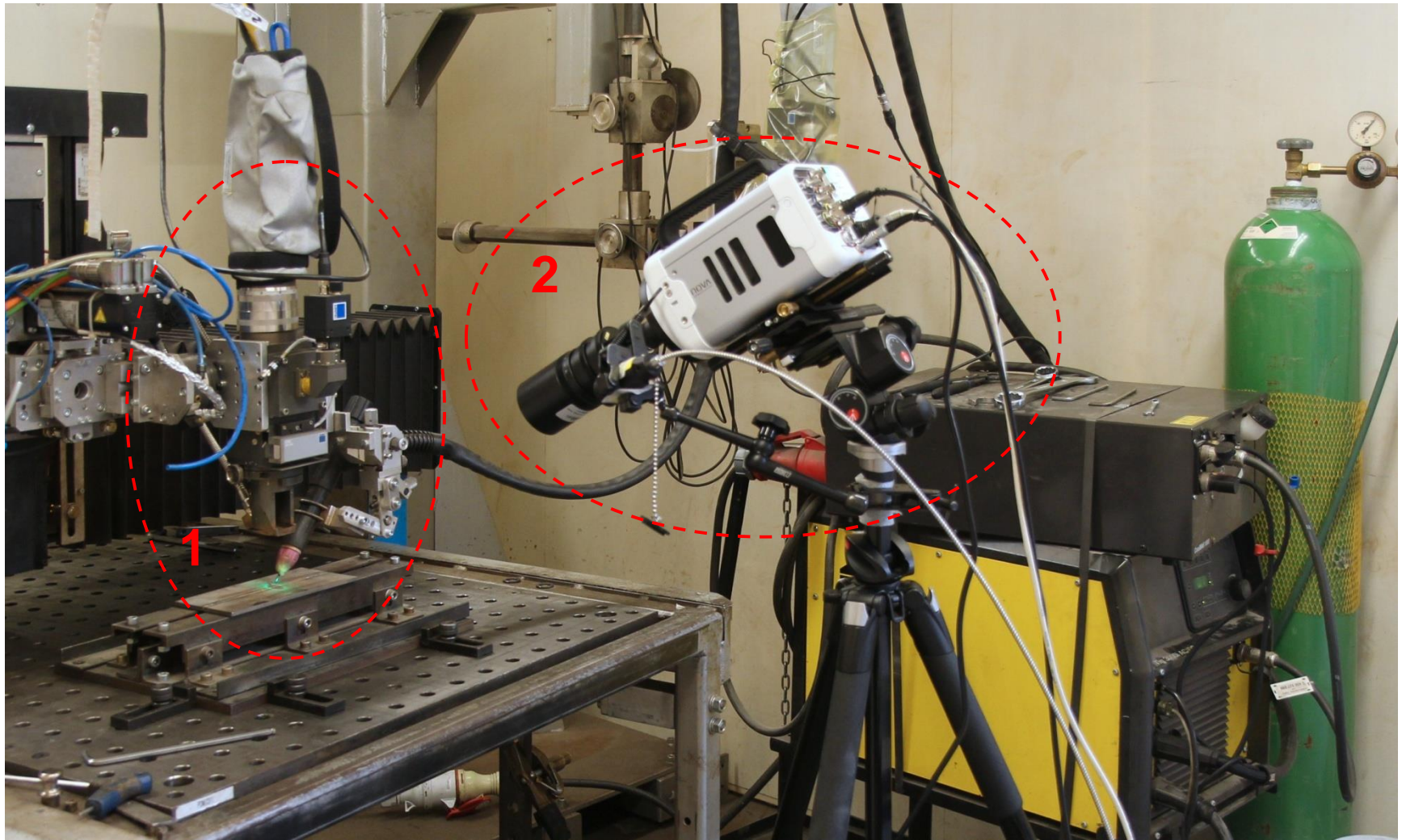


## Experimentálna aparatúra



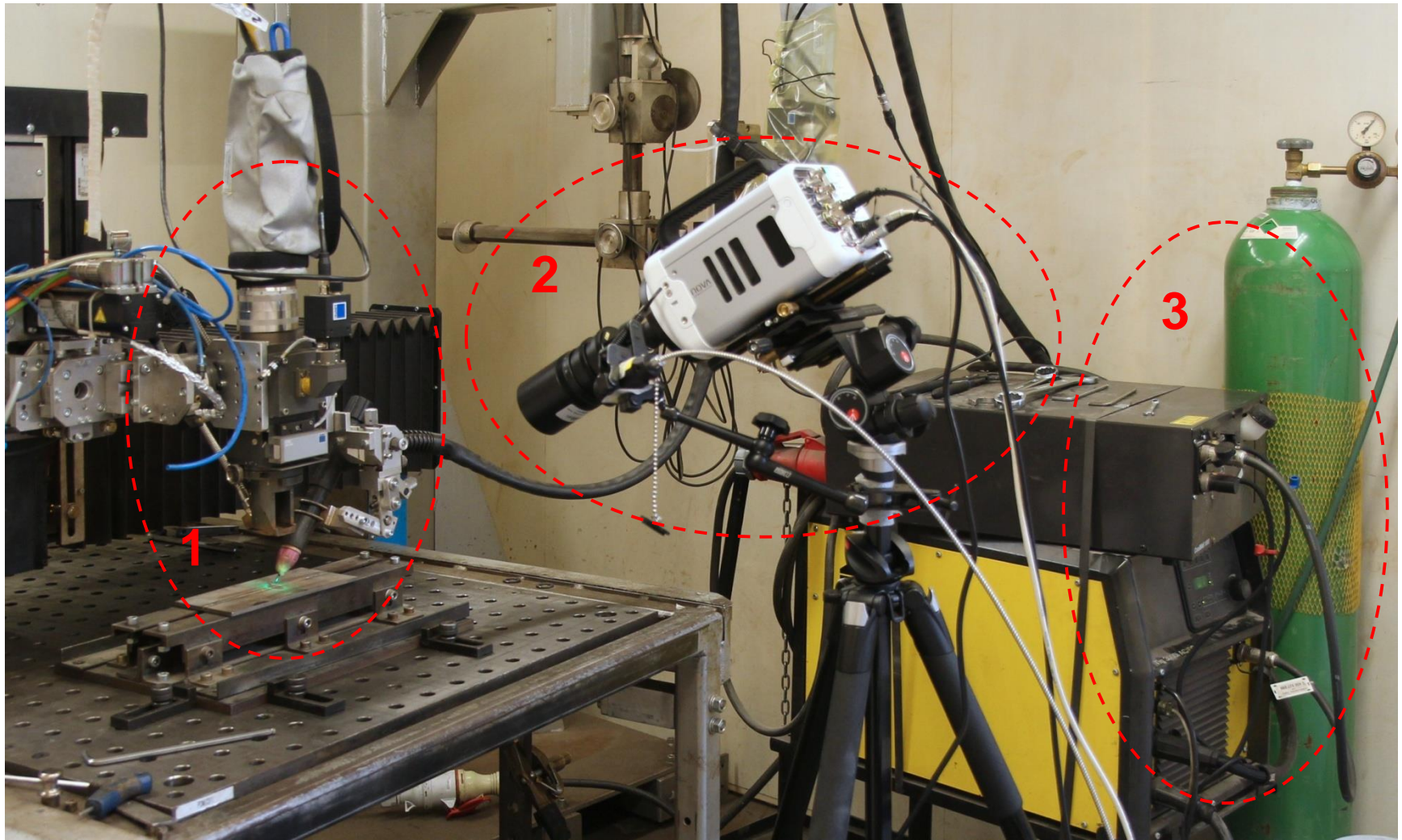


# Experimentálna aparatúra





# Experimentálna aparatúra



## Experimentálna aparatúra



- ❑ Zváracia aparatúra TIG–laser
- ❑ Obidva zdroje v pulznom režime
- ❑ Laserový zdroj – diskový laser TruDisk 5001 ( $\lambda$  1030 nm)
- ❑ Optické vlákno  $\phi$  0.2 mm
- ❑ Maximálny výkon 5 kW
- ❑ fokusovaný optikou s ohniskovou vzdialenosťou 200 mm
- ❑ Oblúčkový zvärací zdroj ESAB Origo TIG 3000i
- ❑ Horák ABITIG 300W MT 4M



## ❑ Vysokorýchlostná kamera Photron Nova S6

- ❑ (max. rozlíšenie 1024x1024 pix. až do rýchlosti 6400 záb./sek, kapacita pamäte 32 GB, monochromatický záznam, 12 bit)
- ❑ Dlhoohniskový objektív (Avenir 16-160/2, C-mount)
- ❑ Filter (BP810 nm, BP470 nm)
- ❑ Osvetľovací zdroj (Cavilux Smart System, 810 nm / 500W)
- ❑ Vlákňový spektroskop Ocean Optics USB 4000



## Experimentálna aparatúra



### ❑ Zváracia aparatúra TIG–laser

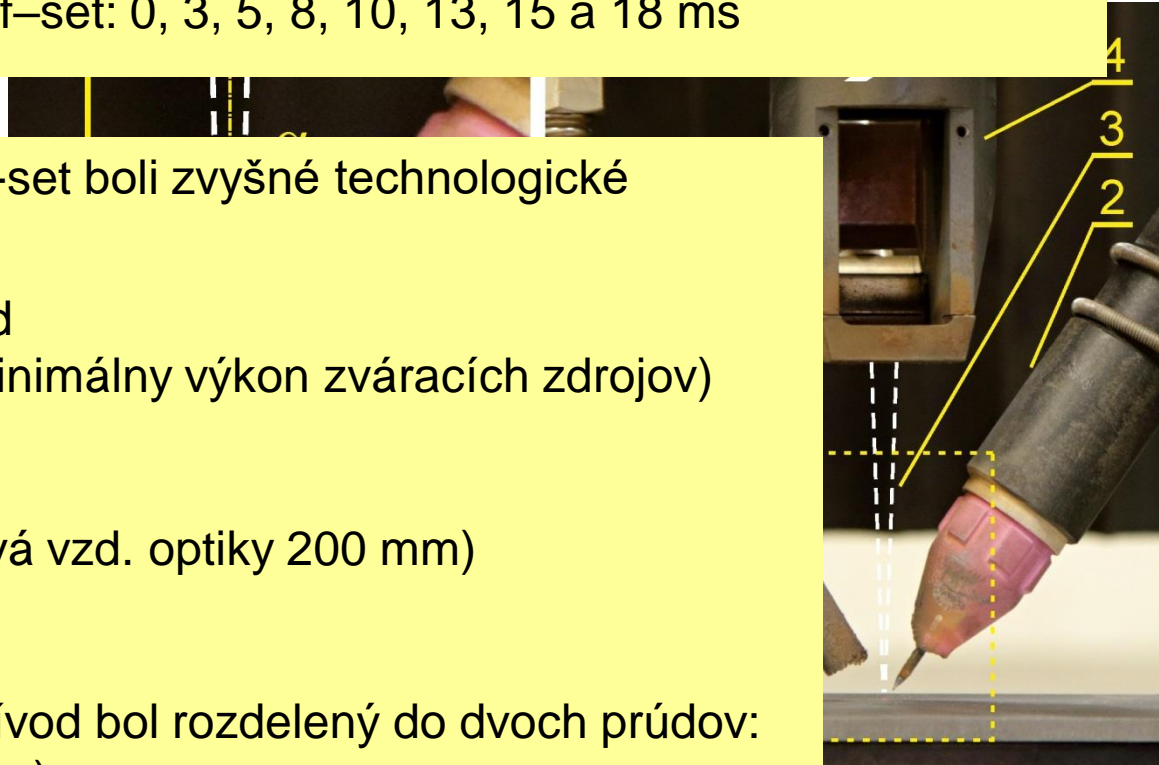
- ❑ Obidva zdroje v pulznom režime
- ❑ Laserový zdroj – diskový laser TruDisk 5001 ( $\lambda$  1030 nm)
- ❑ Optické vlákno  $\phi$  0.2 mm
- ❑ Maximálny výkon 5 kW
- ❑ fokusovaný optikou s ohniskovou vzdialenosťou 200 mm
- ❑ Oblúkový zvärací zdroj ESAB Origo TIG 3000i
- ❑ Horák ABITIG 300W MT 4M

## Experimentálne podmienky a zväracie parametre

- Hlavným analyzovaným parametrom procesu bol synchronizačný parameter – **fázový posun (off-set)** medzi štartom pulzu elektrického oblúka a štartom pulzu lasera.
- Porovnávané úrovne off-set: 0, 3, 5, 8, 10, 13, 15 a 18 ms

Pre lepšie porovnanie vplyvu off-set boli zvyšné technologické parametre konštantné:

- pulzný režim 10/10 milisekúnd  
(10 ms max. výkon / 10 ms minimálny výkon zväracích zdrojov)
- Zvärací prúd 130 – 30 A
- Výkon lasera 3000 W
- Fokusácia: + 5 mm (ohnisková vzd. optiky 200 mm)
- Zväracia rýchlosť: 60 mm/s
- Proces viedol TIG
- ochranný plyn: argón (jeho prívod bol rozdelený do dvoch prúdov: z TIG horáka a prídavnej trysky)



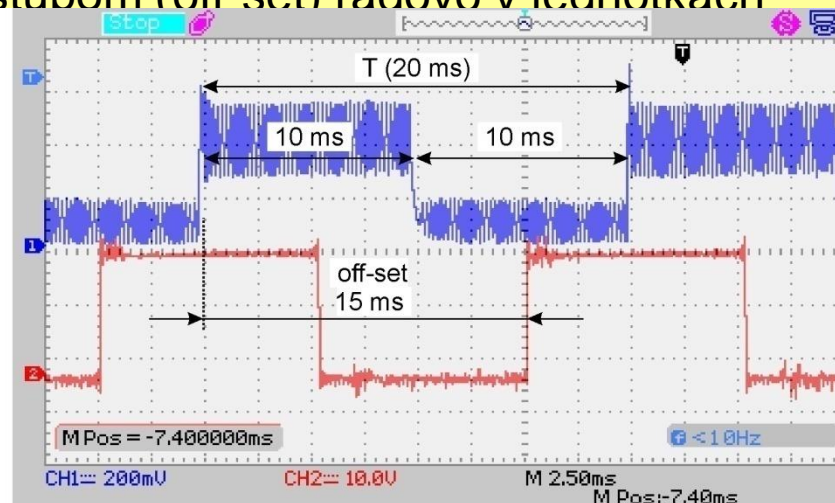
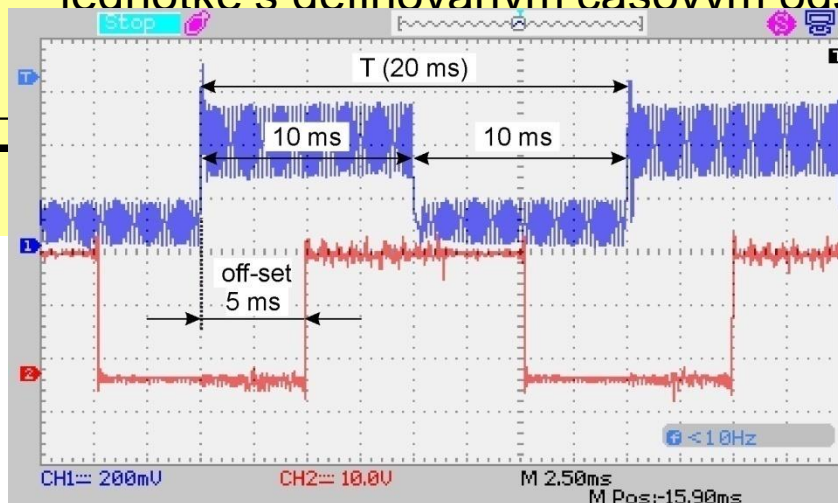
## Hybridné zváranie v pulznom režime zváracích zdrojov

- ❑ Synchronizácia obidvoch výkonových zdrojov bola zabezpečovaná špeciálne vyvinutou externou synchronizačnou jednotkou, kde pulzný priebeh zváracieho procesu bol iniciovaný oblúkovým zváracím zdrojom.
- ❑ Štart pulzu elektrického oblúka bol zaznamenaný meracou sondou a následne synchronizačná jednotka riadila štart pulzu lasera.
- ❑ Okamih štartu laserového pulzu bolo možné nastaviť v synchronizačnej jednotke s definovaným časovým odstupom (off-set) rádovo v jednotkách milisekúnd.
- ❑ Rôznou úrovňou fázového posunu medzi pulzami možno dosiahnuť odlišné situácie vzájomného spolupôsobenia elektrického oblúka a lasera.

Záznamy z osciloskopu získané počas experimentov pulzného hybridného zváracieho procesu s rôznymi parametrami pulzných cyklov. (Modrá čiara – signál priebehu elektrického prúdu zváracieho oblúka, červená čiara – synchronizačný signál laserového pulzu.)

## Hybridné zváranie v pulznom režime zväracích zdrojov

- ❑ Synchronizácia oboch výkonových zdrojov bola zabezpečovaná špeciálne vyvinutou externou synchronizačnou jednotkou, kde pulzný priebeh zväracieho procesu bol iniciovaný oblúkovým zväracím zdrojom.
- ❑ Štart pulzu elektrického oblúka bol zaznamenaný meracou sondou a následne synchronizačná jednotka riadila štart pulzu lasera.
- ❑ Okamih štartu laserového pulzu bolo možné nastaviť v synchronizačnej jednotke s definovaným časovým odstupom (off-set) rádovo v jednotkách



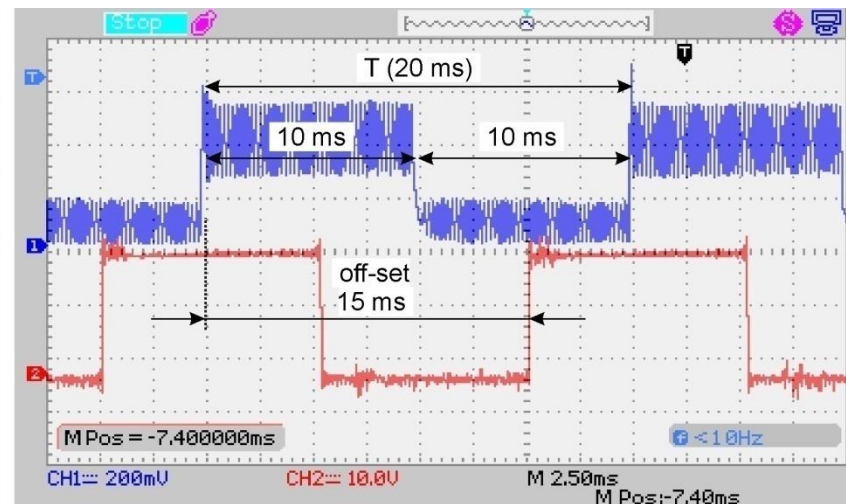
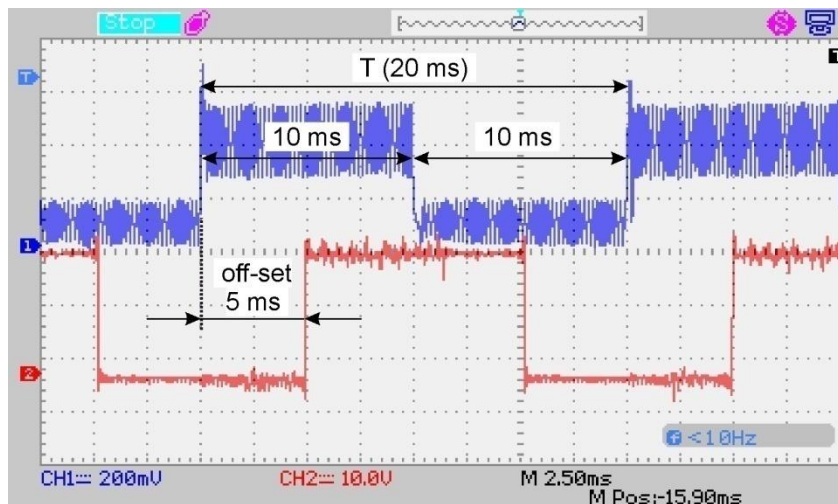
Záznamy z osciloskopu získané počas experimentov pulzného hybridného zväracieho procesu s rôznymi parametrami pulzných cyklov. (Modrá čiara – signál priebehu elektrického prúdu zväracieho oblúka, červená čiara – synchronizačný signál laserového pulzu.)



## Hybridné zváranie v pulznom režime zváracích zdrojov

- ❑ Vo všeobecnosti je plazma, ktorá sprevádza zváracie procesy (tak oblúkové ako aj laserové) dynamicky sa meniaci objekt.
- ❑ V prípade pulzného procesu má táto dynamika periodický charakter, ktorý zodpovedá pulzným parametrom výkonových zdrojov.
- ❑ V závislosti od nastaveného fázového posunu medzi periódami ich vzájomného pôsobenia je možné rozoznávať 4 rôzne úseky:

- (1,2) pôsobenie iba jedného z nich samostatne
- (3) súčasné pôsobenie obidvoch
- (4) súčasne sú v minimálnej úrovni obidva.

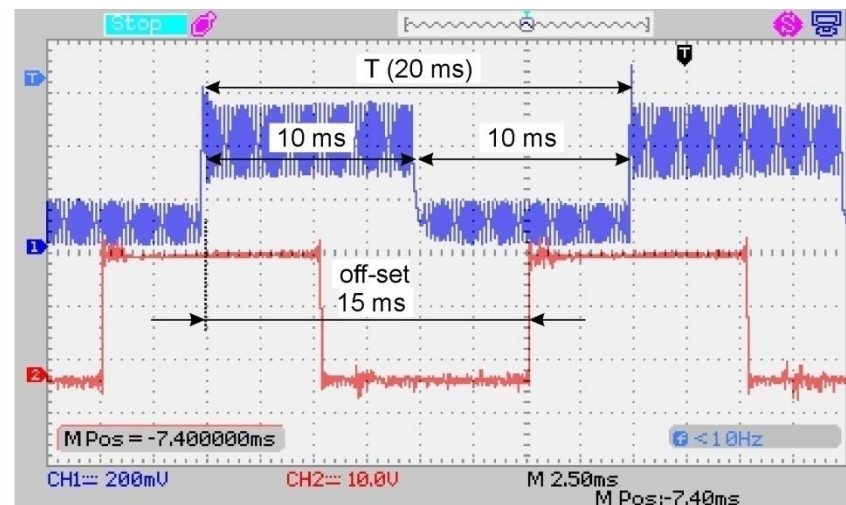
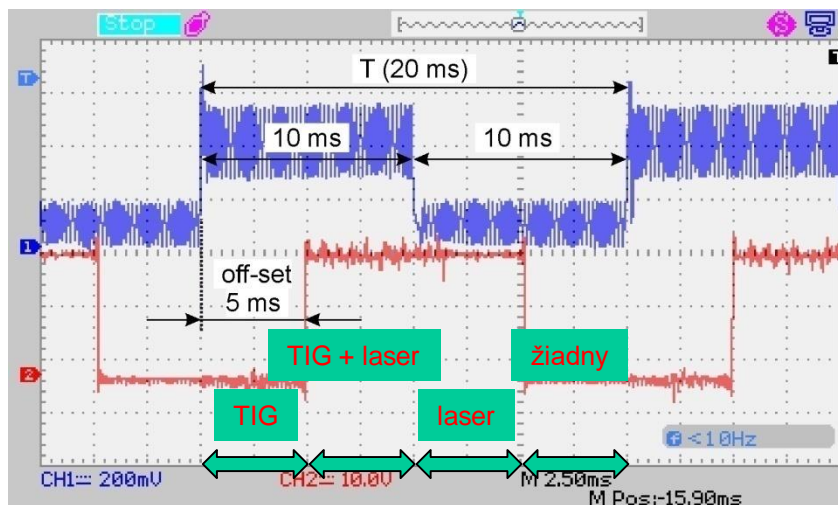




# Hybridné zváranie v pulznom režime zväracích zdrojov

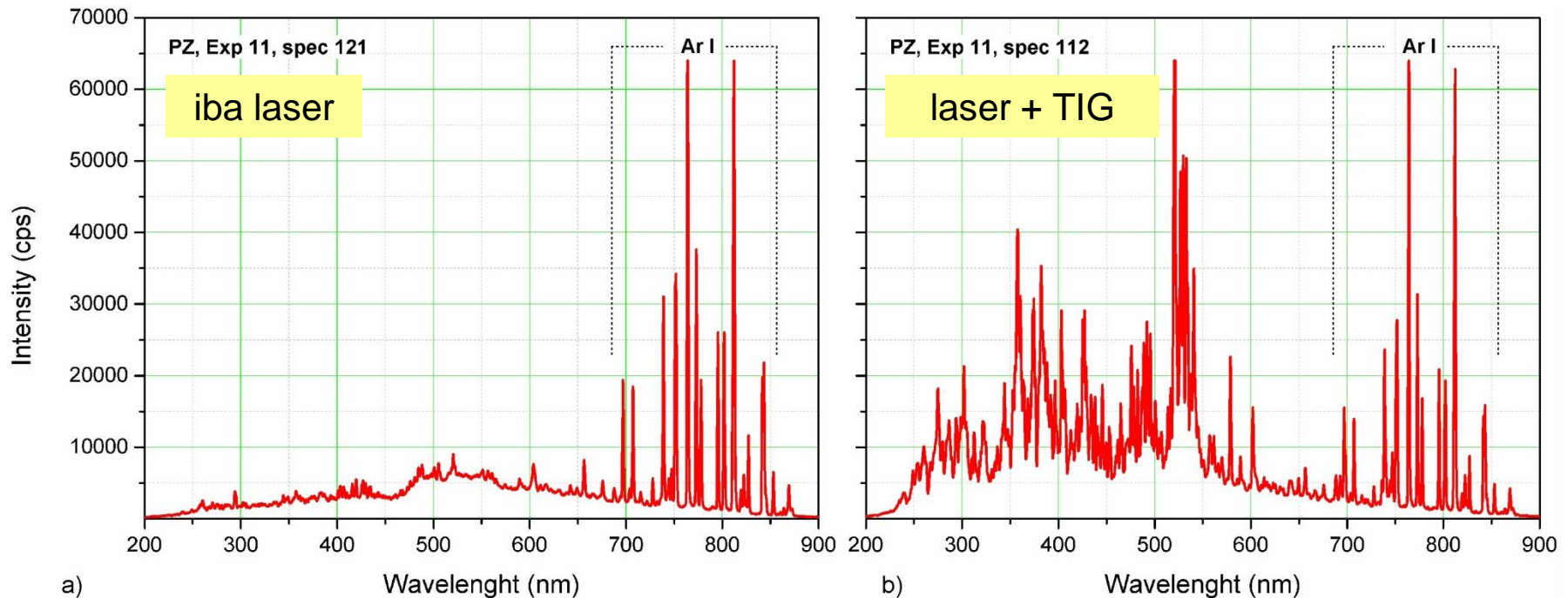
- ❑ Vo všeobecnosti je plazma, ktorá sprevádza zväracie procesy (tak oblúkové ako aj laserové) dynamicky sa meniaci objekt.
- ❑ V prípade pulzného procesu má táto dynamika periodický charakter, ktorý zodpovedá pulzným parametrom výkonových zdrojov.
- ❑ V závislosti od nastaveného fázového posunu medzi periódami ich vzájomného pôsobenia je možné rozoznávať 4 rôzne úseky:

- (1,2) pôsobenie iba jedného z nich samostatne
- (3) súčasné pôsobenie oboch
- (4) súčasne sú v minimálnej úrovni oboja.



# Spektrálna analýza hybridnej plazmy pri zváraní TIG-laser

- ❑ Spektrá zaznamenané počas hybridného zvárania:
- ❑ a) spektrum vo fáze pôsobenia iba lasera
- ❑ b) spektrum hybridizovanej plazmy, keď na jej budenie súčasne pôsobia aj laser aj elektrický oblúk.

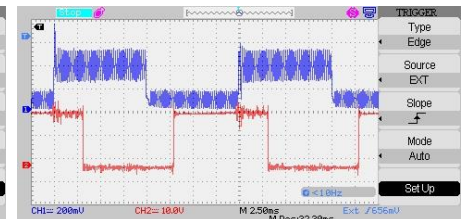
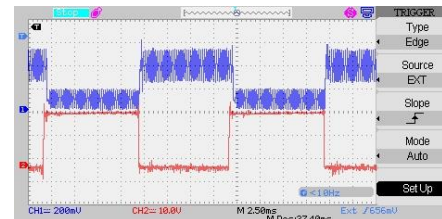
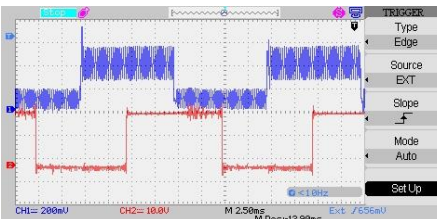
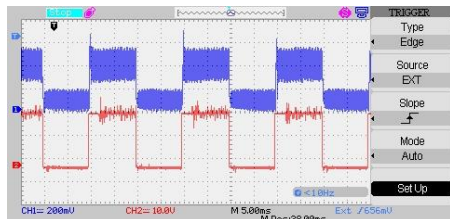


Porovnanie spektier zaznamenaných pri pulznom hybridnom procese TIG-laser. (duplexná ocel' EN 1.4462, hrúbka 5 mm, pulzácia zdrojov 10/10 ms, off-set 15 ms, zvárací prúd 130/60 A, výkon lasera 1.5 kW, poloha ohniska 5 mm, rýchlosť zvárania 60 mm/s)

# Analýza hybridnej plazmy pri zváraní TIG–laser vysokorýchlostnou kamerou

□ V závislosti od nastavenej úrovne off-set nastávajú počas pulznej periódy odlišné situácie, vzájomného spolupôsobenia výkonových zdrojov. V prípade periódy 10/10 ms môže nastať situácia:

- (A) – obidva zdroja štartujú a končia súčasne (off-set = 0 ms)
- (B) – TIG oblúk štartuje samostatne a k nemu sa neskôr pripája laser (off-set <10 ms)
- (C) – súčasne so štartom jedného zo zdrojov nastáva vypnutie druhého (off-set = 10 ms)
- (D) – laser štartuje samostatne a pripája sa TIG (off set >10 ms)

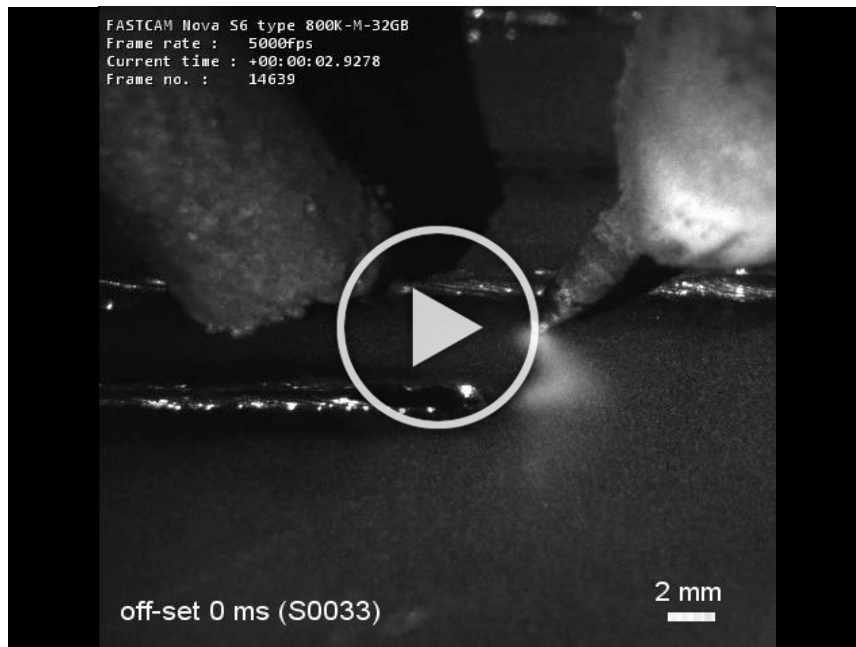


□ Rôzne nastavenia off-set a rôzne poradia výkonových zdrojov v iniciácii aktívnej fázy pulzu sa odzrkadľovali v rôznych vzorcoch vývoja hybridizovanej plazmy a súčasne aj vo výsledných vlastnostiach prievarov.

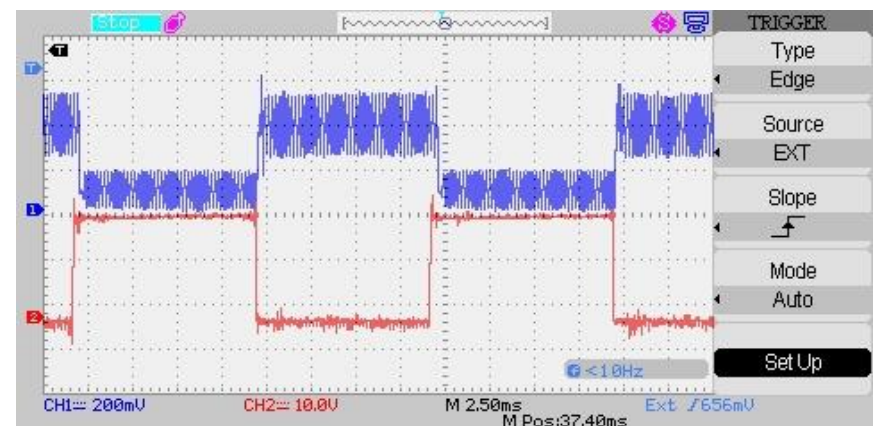
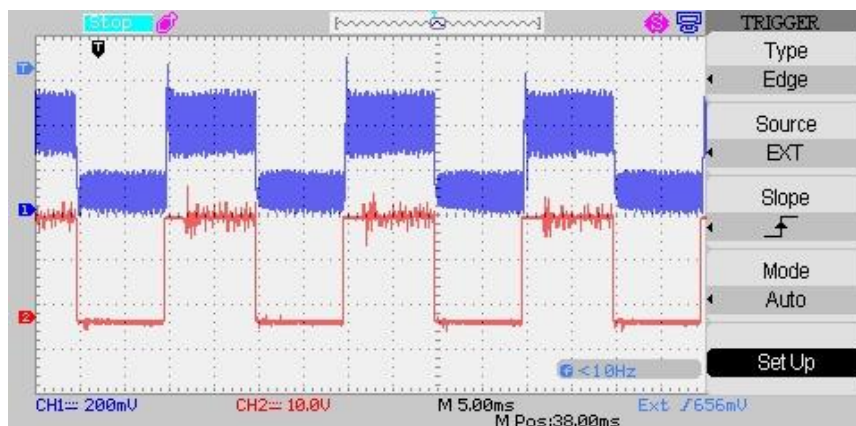
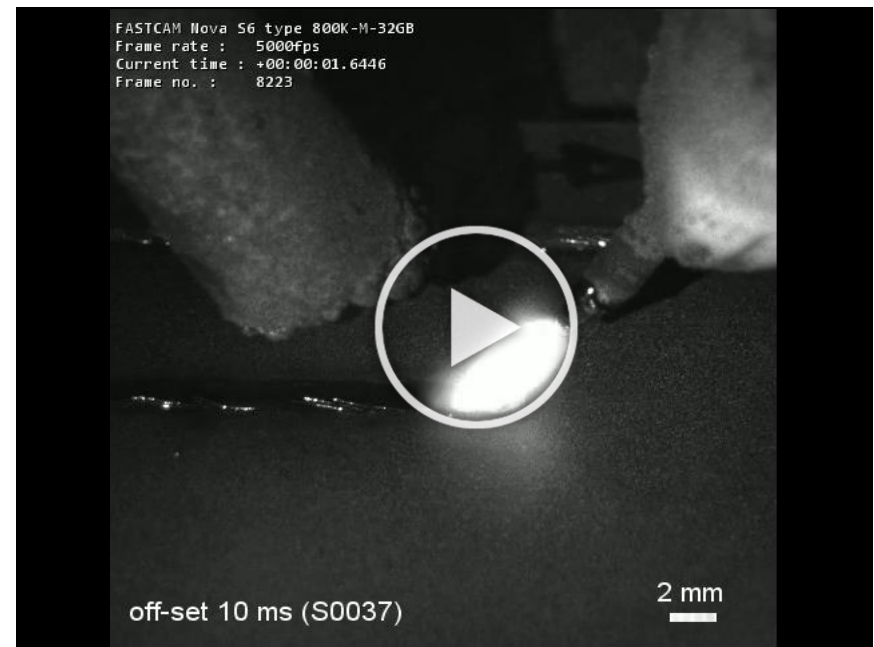


# Porovnanie pre hodnoty off-set = 0 ms a 10 ms

Situácia A: off-set 0 ms



Situácia C: off-set 10 ms



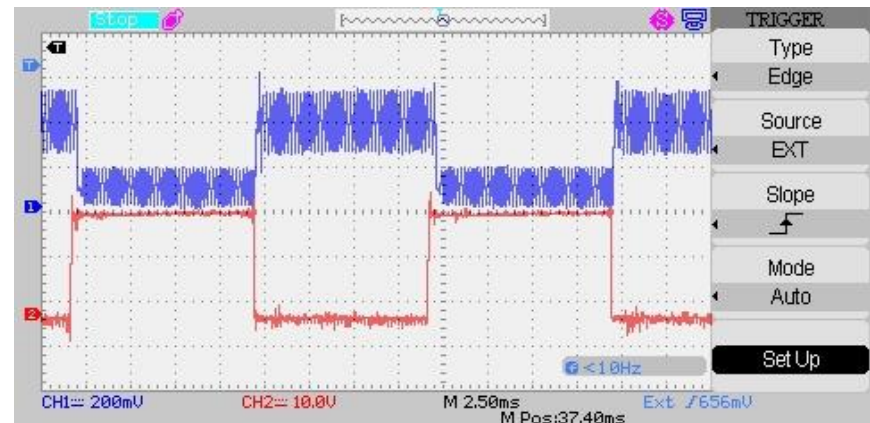
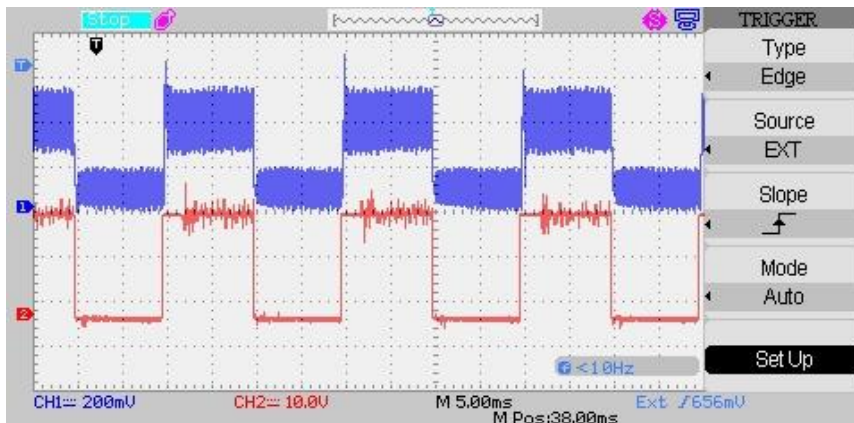


# Porovnanie pre hodnoty off-set = 0 ms a 10 ms

Situácia A: off-set 0 ms



Situácia C: off-set 10 ms



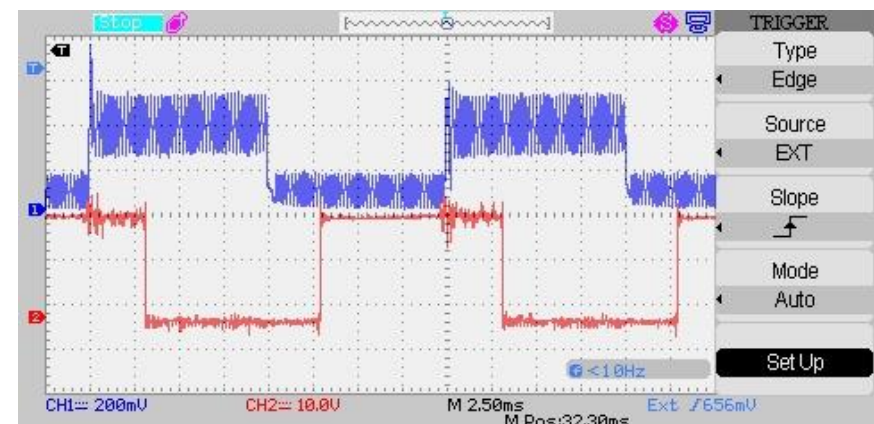
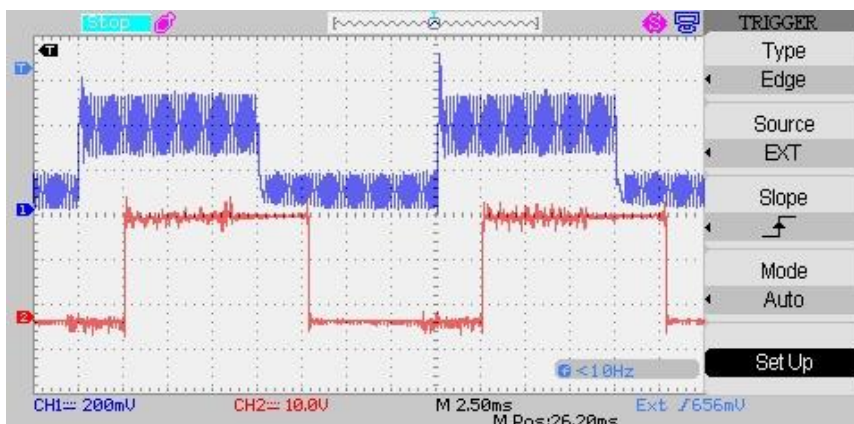
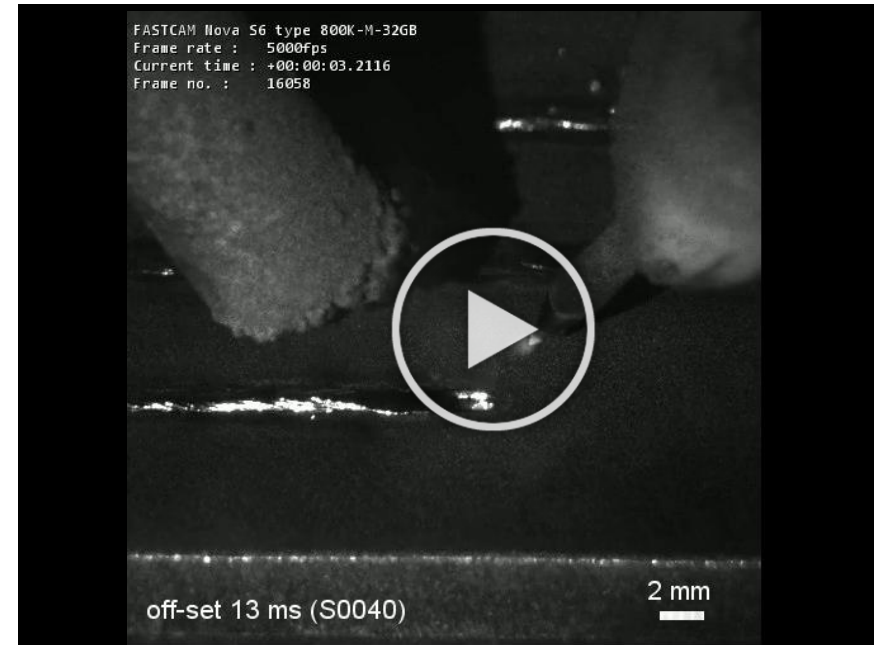


# Porovnanie pre hodnoty off-set = 3 ms a 13 ms

Situácia B: off-set 3 ms

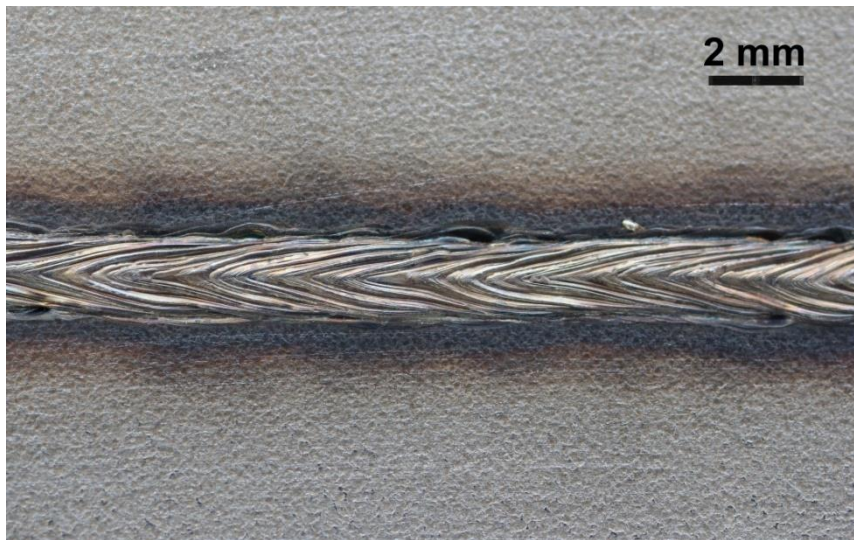


Situácia D: off-set 13 ms

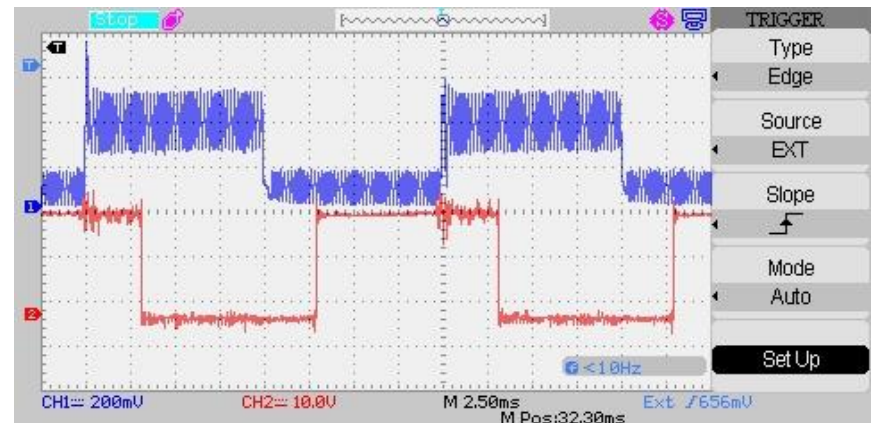
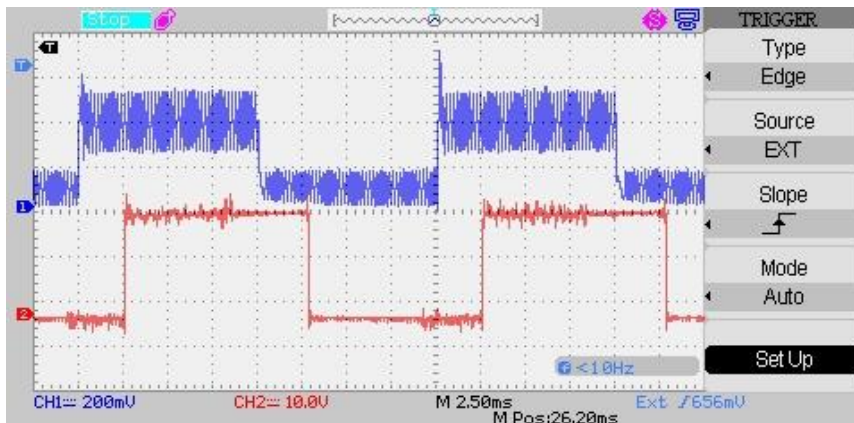


# Porovnanie pre hodnoty off-set = 3 ms a 13 ms

Situácia B: off-set 3 ms

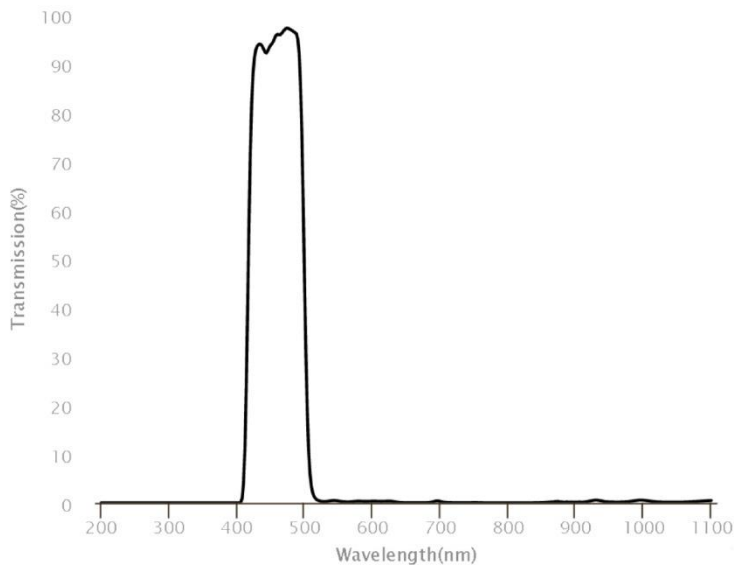


Situácia D: off-set 13 ms





# Synergia plaziem v optickom pásme 425 – 495 nm



Transmisné spektrum filtra BP470

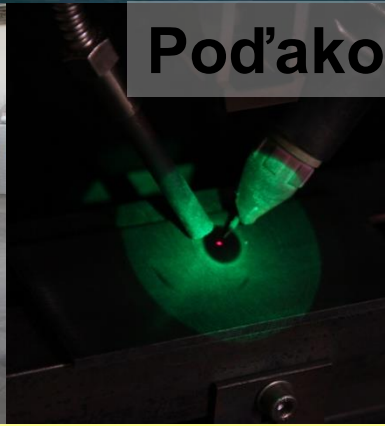


- Jasne sú viditeľné jednotlivé zložky plazmy (TIG a laserová)
- TIG plazma - relatívne stabilné horenie, málo ovplyvnené po pripojení lasera
- Laserová plazma – vysoko nestabilný, dynamicky sa meniaci útvar

## Záver

- ❑ Plazma ako spolupôsobiaci jav účinku výkonových zdrojov v hybridnom zváraní predstavuje komplexný útvar, ktorý je daný predovšetkým ich parametrami.
- ❑ Okrem toho, na jej výsledné vlastnosti má veľký vplyv aj vzájomná synergia týchto zdrojov.
- ❑ V prípade pulzného režimu sa ukazuje ako dôležité poradie, ktorý zdroj iniciuje vznik plazmy.
- ❑ Experimentálne výsledky poukázali na asymetriu v správaní hybridizovanej plazmy v prípadoch keď proces šartuje elektrický oblúk v porovnaní so situáciou, keď sa elektrický oblúk pripája k už bežiacemu laseru.
- ❑ Ďalší výskum bude orientovaný na hľadanie korelačných súvislostí s výslednými vlastnosťami zvarových spojov.

## Pod'akovanie



Kolektív autorov vyjadruje poďakovanie spolupracovníkom z riešiteľského kolektívu zúčastneným v riešení projektu pri realizácii výskumných prác.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy číslo APVV-18-0224

**Výskum hybridného zvarovania v kombinácii laser-TIG v režime synchronizácie pulzov zvaracích zdrojov**

