



Instytut Podstawowych  
Problemów Techniki

Polska Akademia Nauk

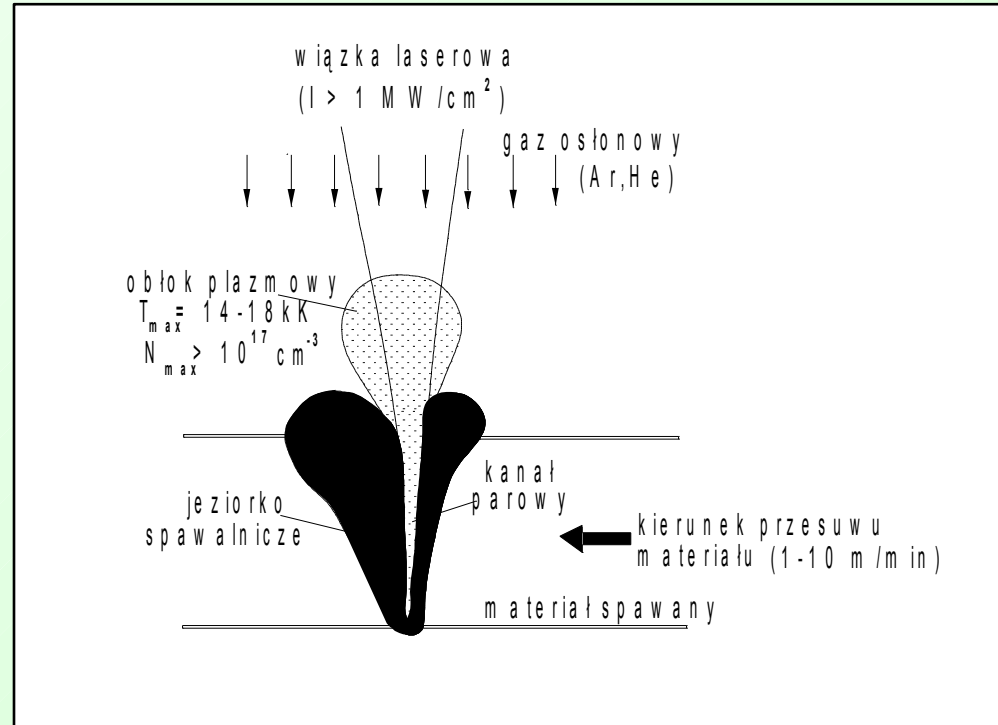
*Modelowanie obłoku  
plazmowego powstającego  
podczas spawania żelaza*

T. Mościcki

W referacie zostanie omówione modelowanie plazmy powstającej podczas spawania **żelaza** laserem  $\text{CO}_2$ . Obliczenia zostały przeprowadzone dla mocy lasera 1700 W i dwóch gazów osłonowych **argonu i helu**. Podczas symulacji rozważono różne prędkości wypływu gazów osłonowych jak i par metalu. Wyniki pokazują, że podczas gdy gazem osłonowym jest argon obserwujemy dwie plazmy: plazmę argonu i plazmę żelaza, natomiast w przypadku helu tylko jedną – plazmę żelaza. Wyniki są zgodne z eksperymentem.

# Zjawisko powstawania plazmy podczas spawania laserowego

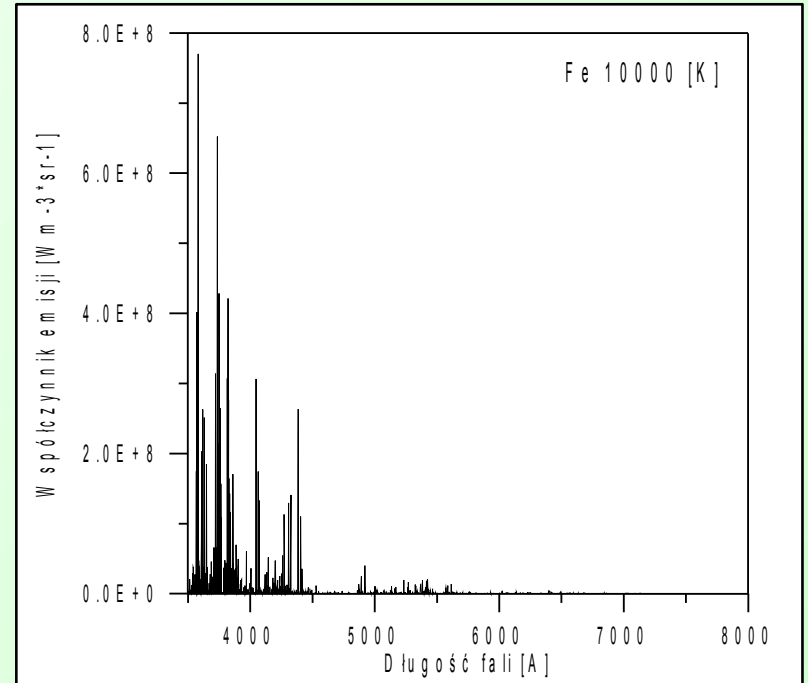
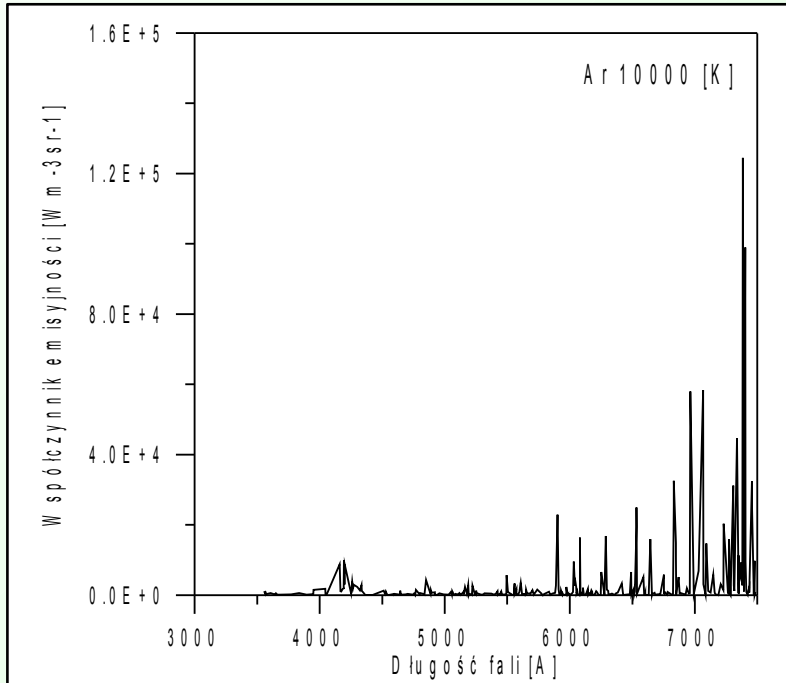
- Powstanie kanału parowego
- Erupcja par metalu
- Napływ gazu osłonowego i mieszanie się z parami metalu



## Zjawiska związane z obłokiem plazmowym

oddziaływanie par metalu z gazem osłonowym (mieszanie, chłodzenie), absorpcja wiązki laserowej, refrakcja, promieniowanie plazmy

# Interpretacja kolorowych zdjęć plazmy



Współczynniki emisji linii żelaza i argonu w zakresie fal widzialnych dla temperatury 10000 K

# Analiza kolorów plazmy

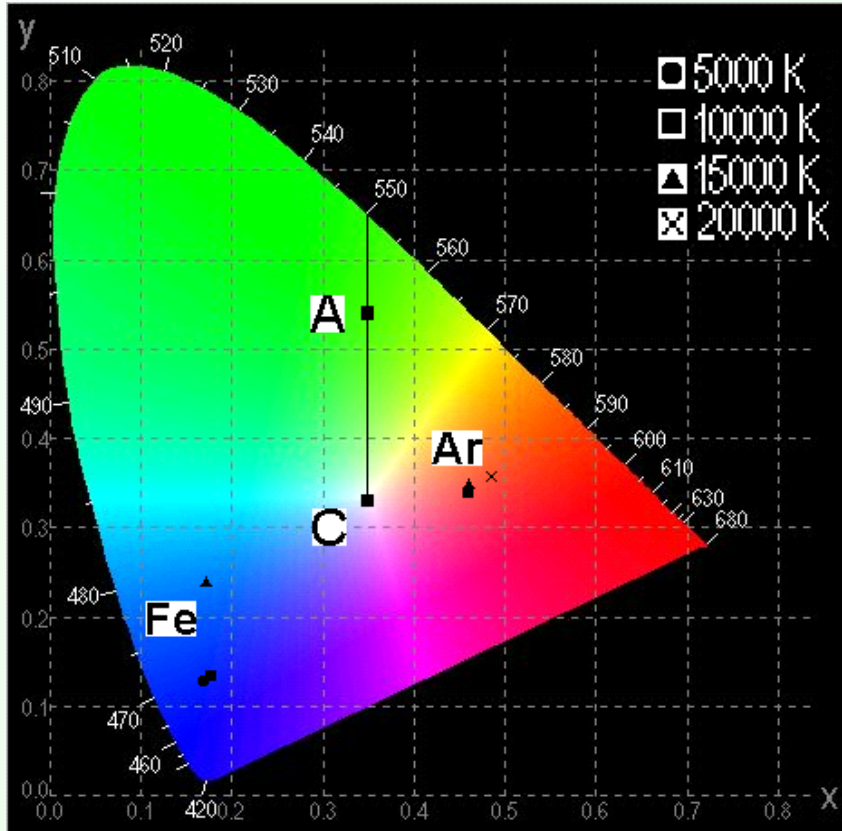
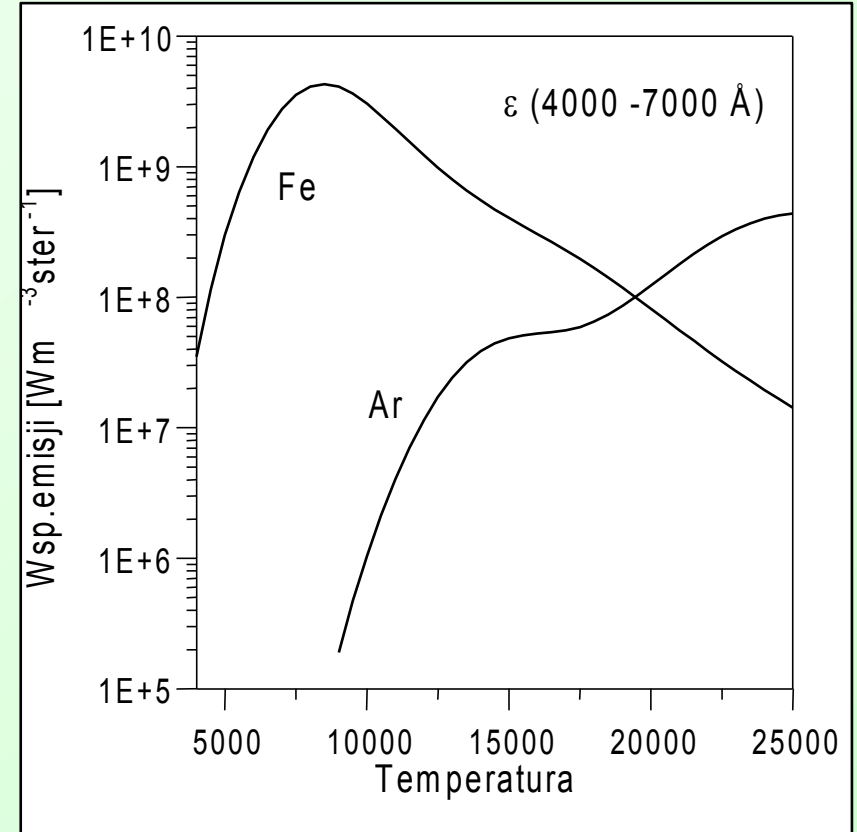
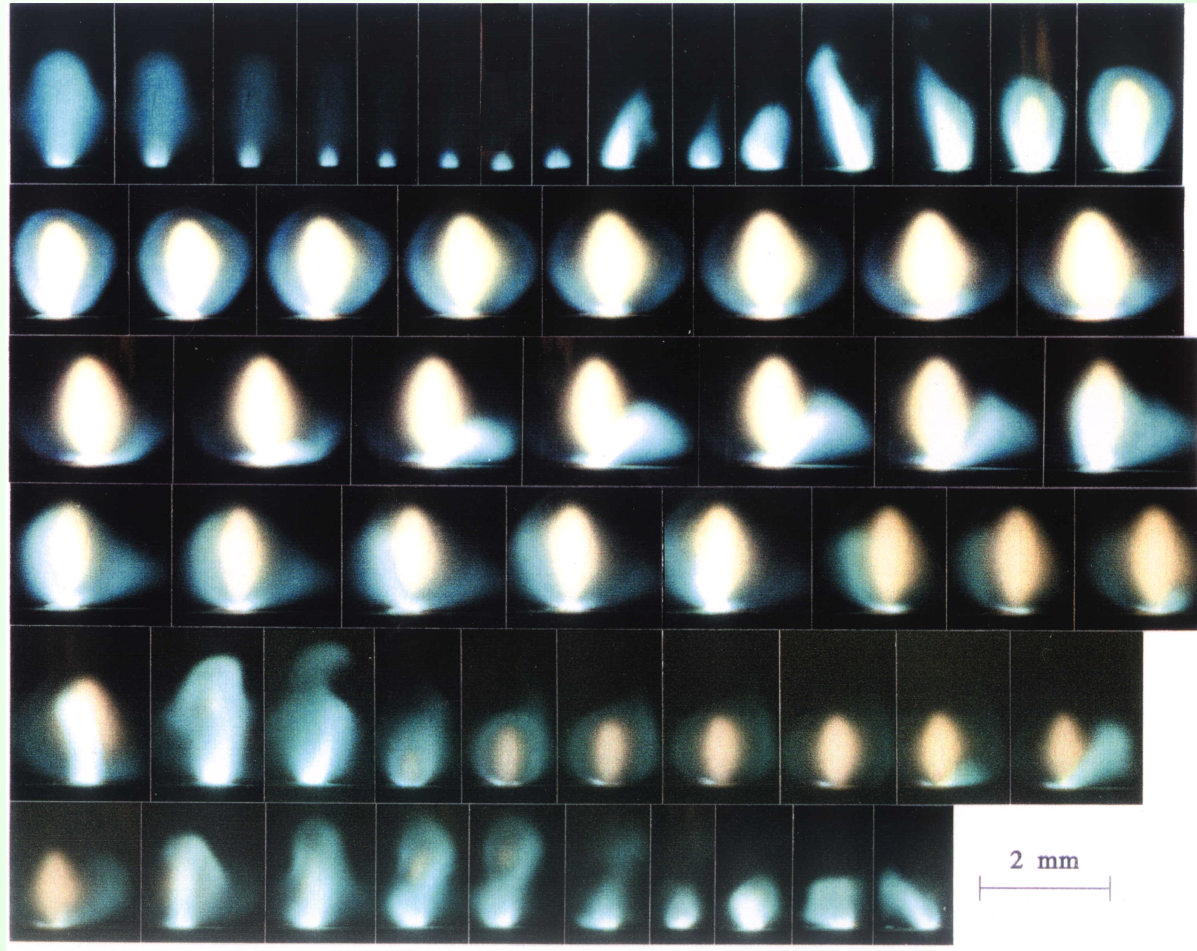


Diagram CIE z obliczonymi kolorami plazmy żelaza i argonu w różnych temperaturach



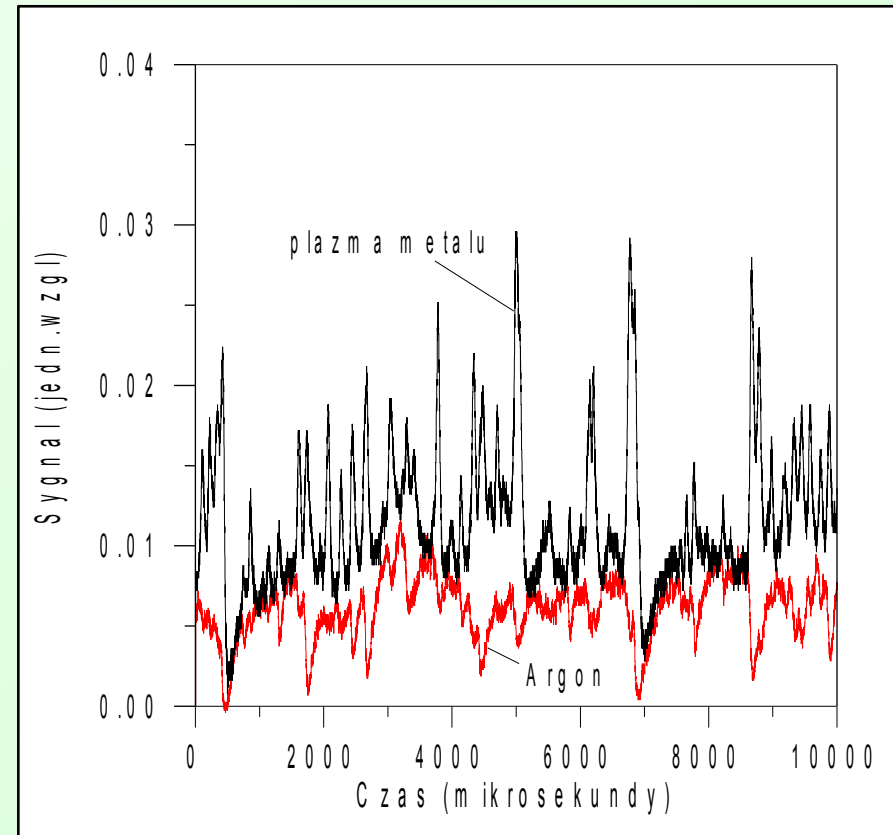
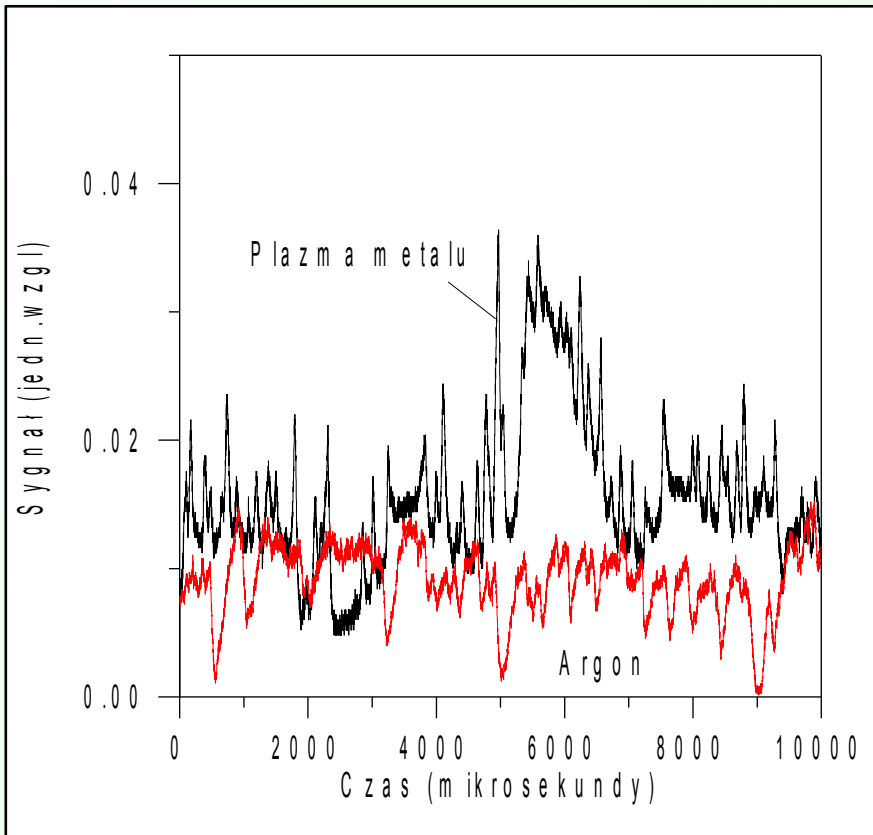
Porównanie promieniowania plazmy argonu i metalu w zakresie widzialnym w zależności od temperatury

## Zdjęcia plazmy zrobione kamerą szybką

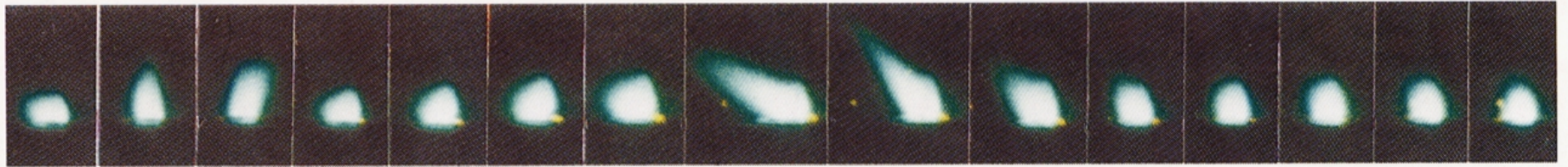


Czas ekspozycji  $10 \mu\text{s}$ , odstęp między ujęciami  $40 \mu\text{s}$ . Moc lasera  $2\text{kW}$ . Materiał spawany stal 1H18N9 o grubości  $2\text{mm}$ . Prędkość spawania  $1\text{m/min}$ . Gaz osłonowy argon  $10 \text{l/min}$ . Maksymalne wysokości obłoku około  $1.8\text{mm}$ . Niebieski obłok – plazma w parach metalu, różowy – plazma argonowa. (Kurzyńska J., Szymański Z., Peradziński Z. 1995, *J.Tech.Phys.* 36, 131-148)

# Analiza pomiarów spektroskopowych



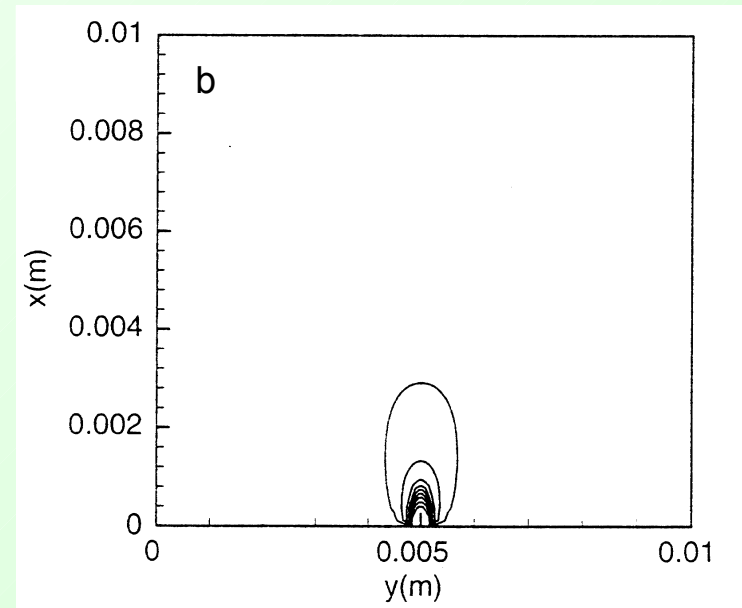
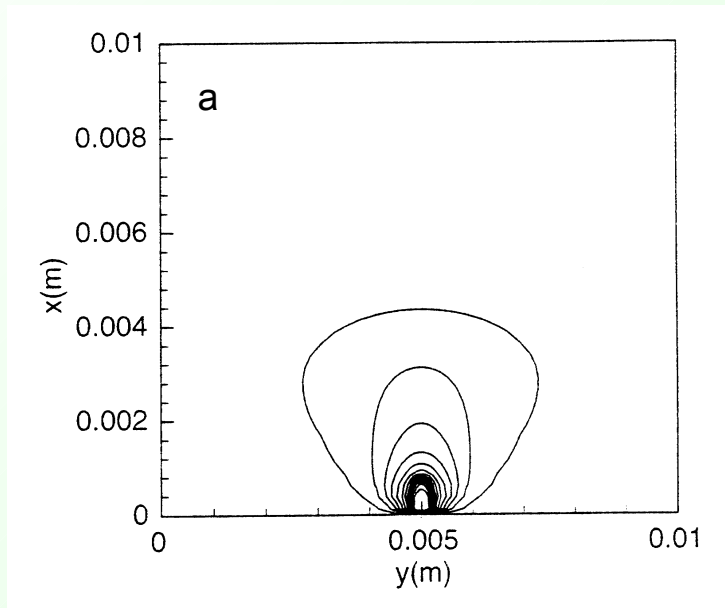
Typowe sygnały optyczne emitowane przez obłok plazmowy powstający przy spawaniu stali nierdzewnej o grubości 2 mm. Czarna linia – sygnał z fotodiody, czerwona – promieniowanie linii argonu Ar I 7504 Å



Zdjęcia obłoku plazmowego zrobione kamerą do szybkich zdjęć. Czas ekspozycji  $10 \mu\text{s}$ , odstęp między ujęciami  $40 \mu\text{s}$ . Moc lasera 2 kW. Materiał spawany stal 1H18N9 o grubości 2 mm. Prędkość spawania 1 m/min. Gaz osłonowy hel 40 l/min. Maksymalne wysokości obłoku  $\sim 0.5$  mm. Niebieski obłok – plazma w parach metalu (Kurzyńska J., Szymański Z., Peradziński Z. 1995, *J.Tech.Phys.* **36**, 131-148)



# Dotychczasowe wyniki



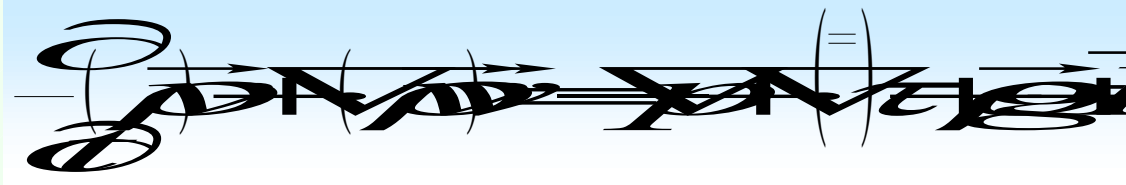
Rozkłady temperatury (a) i ułamek masowego  $Y$  (b) w płaszczyźnie  $x$ - $y$  i  $z=5$  mm. Prędkość par na wylocie z kanału 100 m/s. Temperatura par na wylocie z kanału parowego 10000 K. Prędkość argonu na wylocie z dyszy 5 m/s, temperatura 300 K. Prędkość par na wylocie z kanału 100 m/s. Zewnętrzna izoterma  $T=1000$  K, zewnętrzny kontur  $Y=0.1$ . Moc lasera 2600 W. (Wang Hai-Xing and Chen Xi 2003 *J.Phys D:Appl.Phys.*36 628-639)

# Układ równań (Fluent 6.1)

- **Równanie zachowania masy**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

- **Równanie zachowania pędu**



=  
gdzie  $\tau$  jest tensorem naprężeń lepkich

$$\tau = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$$

$\rho$  - gęstość masowa,

$\vec{v}$  - wektor prędkości,

$p$  - ciśnienie,

$g$  - grawitacja,

$\vec{F}$  - siły zewnętrzne,

$\mu$  - lepkość dynamiczna,

$I$  - tensor jednostkowy

## Równanie zachowania energii

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \kappa I_L - R$$

gdzie

$$E = h - \frac{p}{\rho} + 0.5v^2$$

$$h = \sum_j Y_j h_j$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$$

$E$  – energia,

$h$  - entalpia całego układu,

$h_j$  - entalpia składników,

$\lambda$  - współczynnik przewodnictwa cieplnego,

$T$  - temperatura,

$\kappa$  - współczynnik absorpcji promieniowania laserowego,

$I_L$  - natężenie wiązki laserowej,

$R$  - straty promieniste plazmy,

$c_{p,j}$  - ciepło właściwe składnika

## Równanie dyfuzji

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i$$

gdzie  $\vec{J}_i$  strumień dyfuzyjny składnika  $i$

$$\vec{J}_j = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i$$

a  $Y_i$  ułamek masowy składnika  $i$

$$Y_i = \frac{M_i}{M_i + M_k} = \frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_k} = \frac{m_i \sum_j n_{i,j}}{m_i \sum_j n_{i,j} + m_k \sum_j n_{k,j}}$$

$D_{i,m}$  - współczynnik dyfuzji,

$M_i$  - masa  $i$ -tego składnika,

$m_i$  - masa atomowa

$n_i$  - gęstość cząsteczek

# Człon źródłowy w równaniu energii

Natężenie wiązki laserowej

$$I_L = \frac{2P_L}{\pi w^2(z)} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-\int \kappa dz\right)$$

gdzie

$$w^2(z) = w_0^2 \left( 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right)$$

$z_0$  jest długością Rayleigh'a,  $r$  i  $z$  są odpowiednio składowymi radialną i osiową w zależności od drogi przebytej przez wiązkę. Pierwsze równanie opisuje zogniskowaną wiązkę gaussowską, a znajdujący się na końcu tego równania człon wykładniczy określa osłabienie wiązki na drodze do punktu o współrzędnych  $r$  i  $z$ . W obliczeniach zostało przyjęte, że promień wiązki w ognisku  $w_0$  wynosi 0.15 mm, natomiast  $f/D$  gdzie  $f$  jest ogniskową soczewki, a  $D=2w(f)$  średnicą wiązki na soczewce wynosi 7.

# Warunki brzegowe

## Wlot par metalu

- $D_p = 0.4$  mm
- $v_z = 100$  m/s,  $T = 10000$  K
- $v_r = 0$

## Wlot gazu osłonowego Ar, He

- $D_{go} = 6$  mm
- $v_z = 25$  m/s,  $T = 300$  K
- $v_r = 0$

## Wylot (pressure outlet)

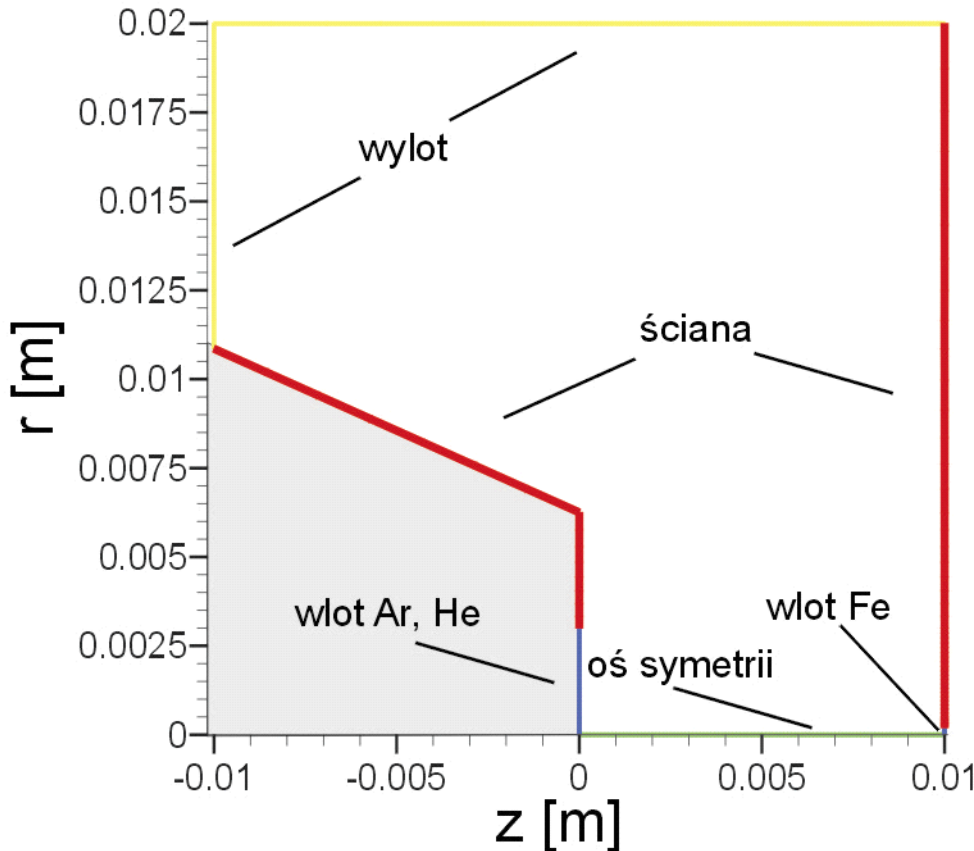
$$p_s = p_o = 101300 \text{ Pa}$$

## Ściany

$$v_r = v_z = 0, T_{\text{śc}} = 300 \text{ K}$$

## Oś symetrii

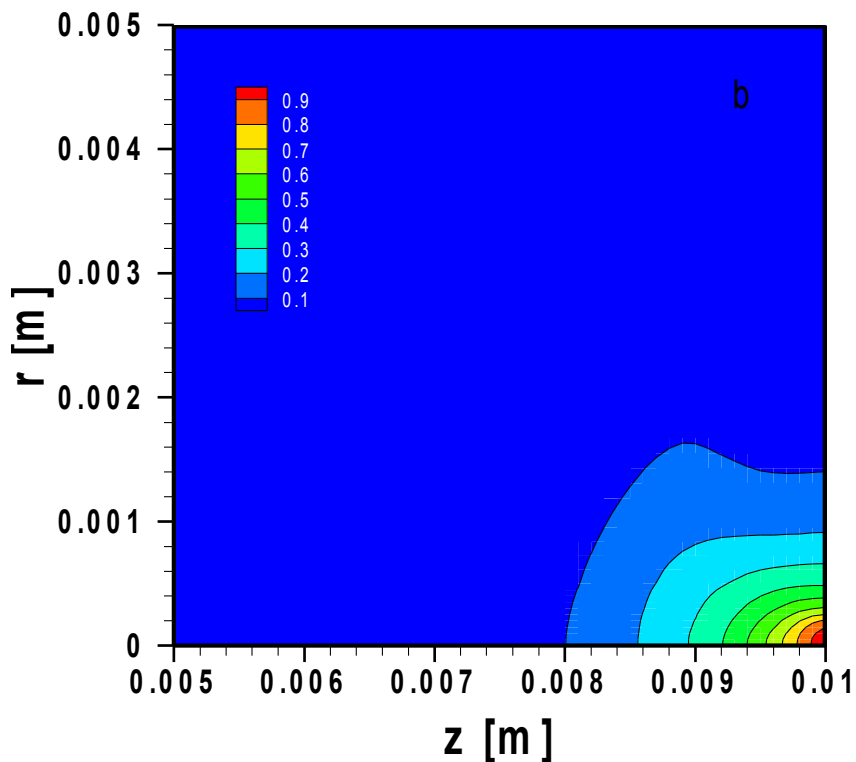
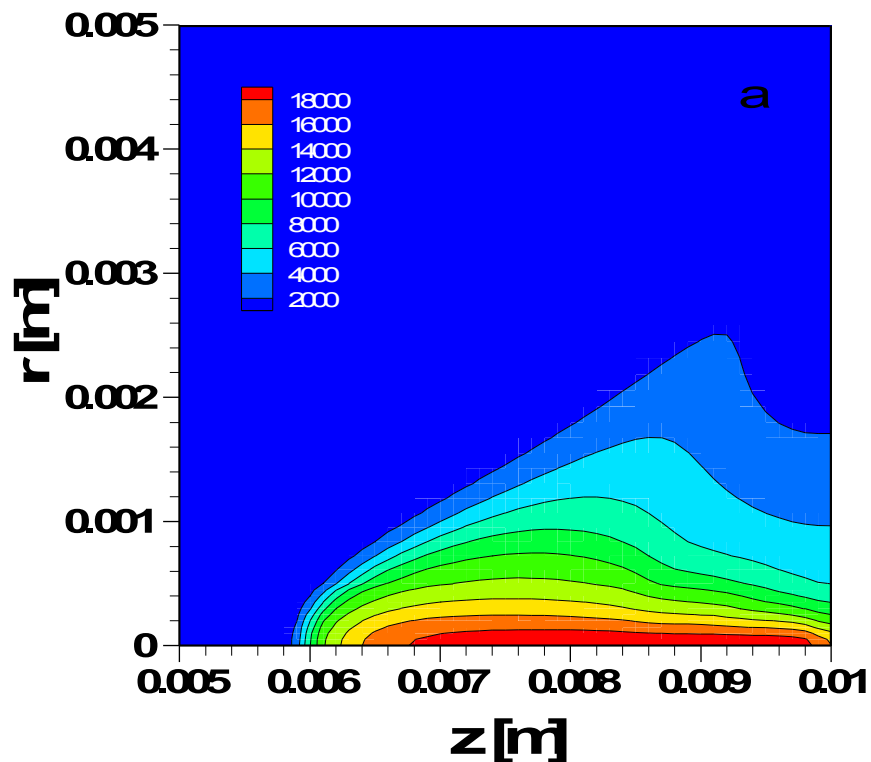
$$v_r(r=0) = 0 \text{ i } \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$



# Funkcje materiałowe

Wielkość	Źródło
<u>gęstość</u>	$\rho_{Fe}, \rho_{Ar}, \rho_{He}$ <b>obliczona</b> (program Mix, autor J. Kurzyna)
<u>ciepło właściwe</u>	$c_{pFe}$ <b>obliczone</b> $c_{pAr}, c_{pHe}$ Literatura (Drelishak 1963)
<u>Lepkość,</u> <u>przewodność</u> <u>cieplna</u>	$\mu_{Fe}, \lambda_{Fe}$ literatura (K. Makowski 1998) $\mu_{Ar}, \lambda_{Ar}$ Literatura (Devoto 1973) $\mu_{He}, \lambda_{He}$ literatura (Lick, Emmons 1962 )
<u>współczynnik</u> <u>pochłaniania</u>	$\kappa_{He+Fe}$ <b>obliczony</b> (program Mix) $\kappa_{Ar+Fe}$
<u>promieniowanie</u> <u>plazmy</u>	$R_{He+Fe}$ <b>Obliczone</b> $R_{Ar+Fe}$ <b>Obliczone + Menart, Malik 2002</b>
<u>współczynnik</u> <u>dyfuzji</u>	$D_{He+Fe}$ <b>obliczony</b> $D_{Ar+Fe}$

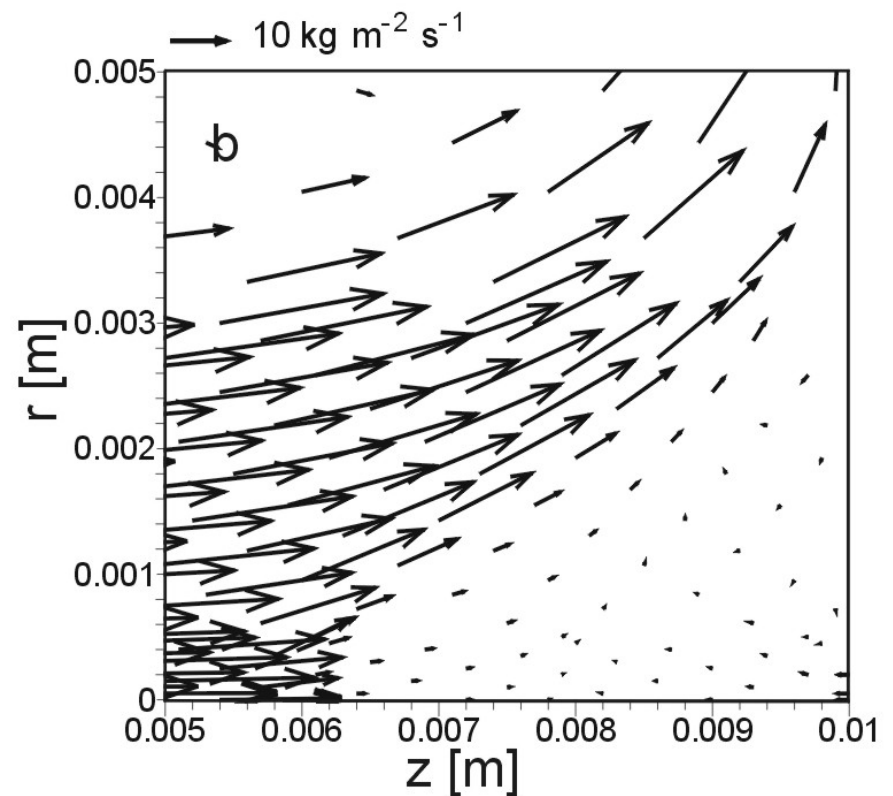
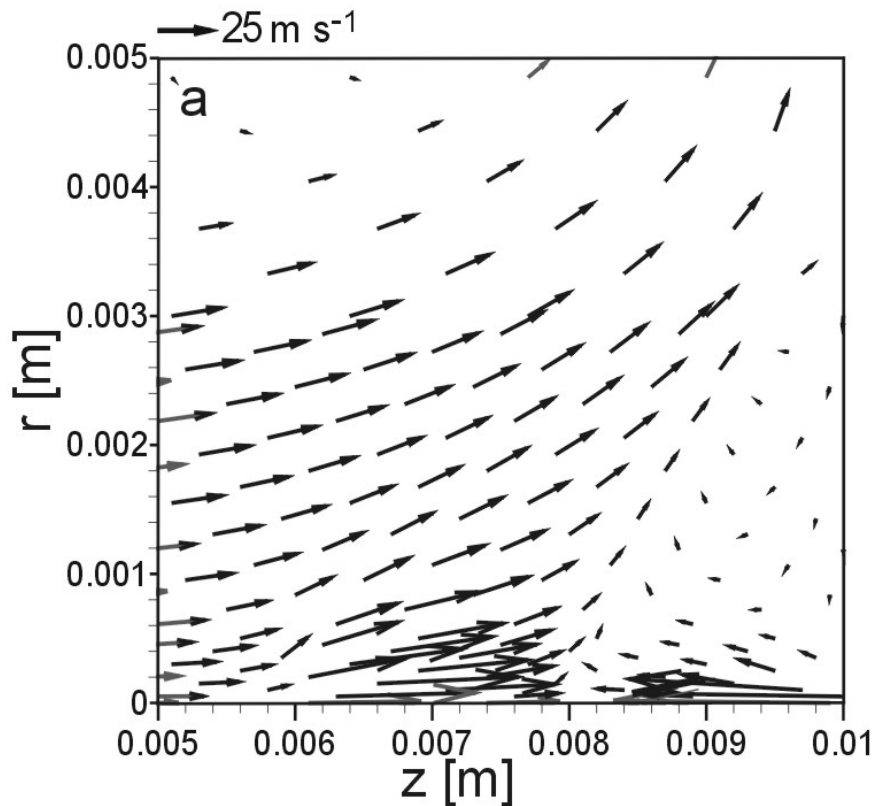
Funkcje materiałowe dla mieszanin Fe+He, Fe+Ar oblicza Fluent (metoda Wilke'go). Obliczenia dla mieszaniny Fe+Ar sprawdzone z T. Amakawa, K. Adachi, Y. Okhi, Thermodynamic properties and viscosity of high temperature argon mixed with iron vapor, T.IEE Japan, Vol. 119-A, No. 1,'99



**Pole temperatur (a) i ułamek masy par żelaza (b) w plazmie powstałej podczas spawania laserowego.** Gaz osłonowy **argon** o parametrach **25 m/s** i **300 K** na wylocie z dyszy. Pary metalu o parametrach **100 m/s** i **10 kK** na wylocie z kanału parowego. Moc lasera **1700 W**. Zewnętrzna izoterma 2000 K. Odstęp izoterm 2000 K. Powierzchnia metalu i ognisko wiązki laserowej w  $z=0.01$  m.

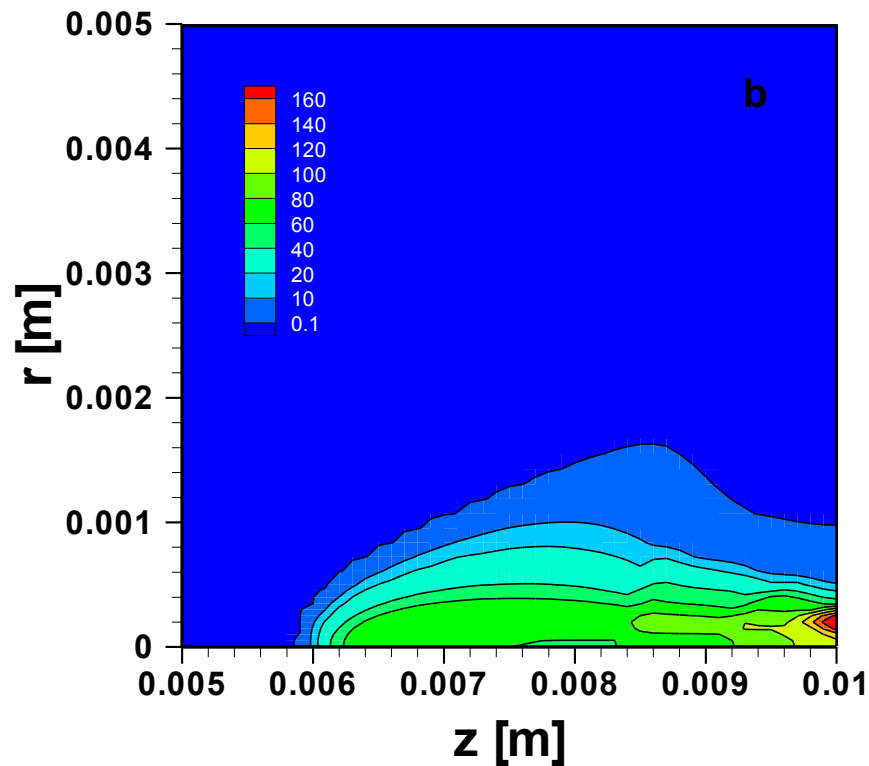
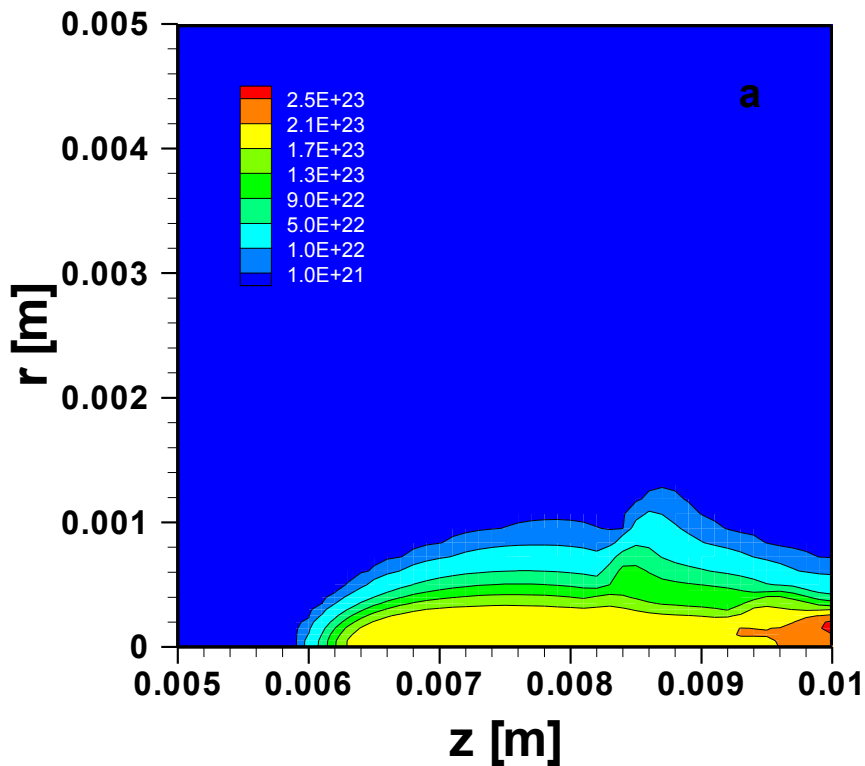
Maksymalna temperatura około **19 kK**, moc pochłonięta przez plazmę **450 W**, co stanowi około **26.5%** mocy wiązki, przy czym sama plazma argonu pochłania około **11.7%** mocy wiązki. Moc wypromieniowana przez plazmę **352 W**



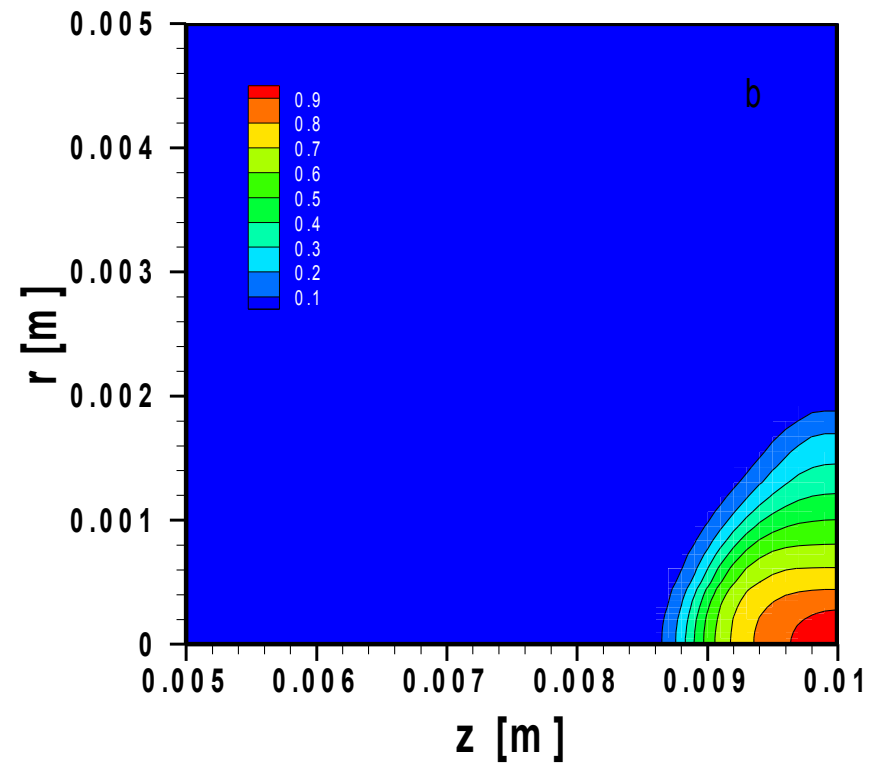
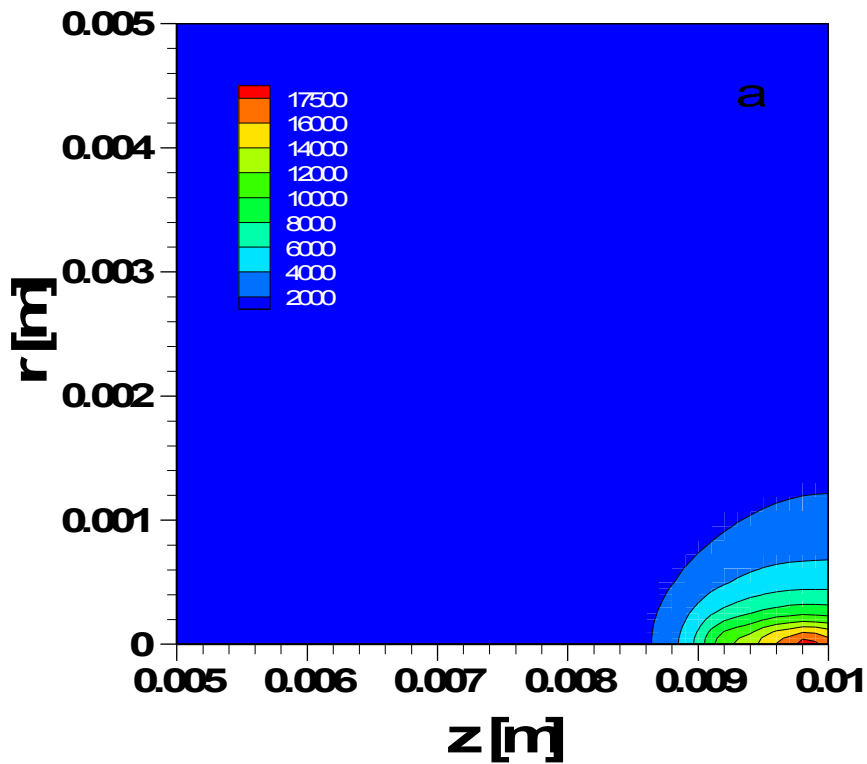


Wektory prędkości (a) i strumienia masy (b) w obłoku plazmowym. Gaz osłonowy [argon](#) .

W gorącym obszarze prędkość argonu znacząco wzrasta – od **25** do **70 m/s**, a par metalu do **110 m/s**. W odróżnieniu od prędkości wartość strumienia masy spada w momencie kiedy gaz dociera do gorącego obszaru, którego granica znajduje się **4 mm** nad powierzchnią próbki.



Rozkład gęstości elektronów (a) i współczynnika absorpcji (b) (jednostki SI odpowiednio  $m^{-3}$  i  $m^{-1}$ ) w plazmie powstającej podczas spawania laserowego



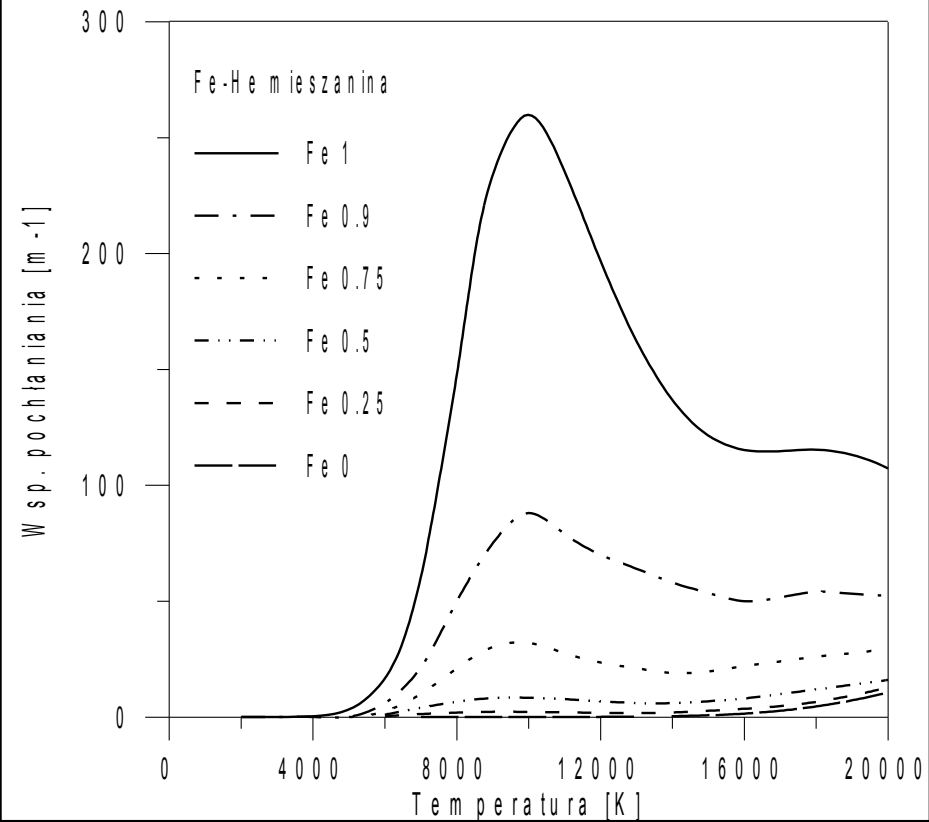
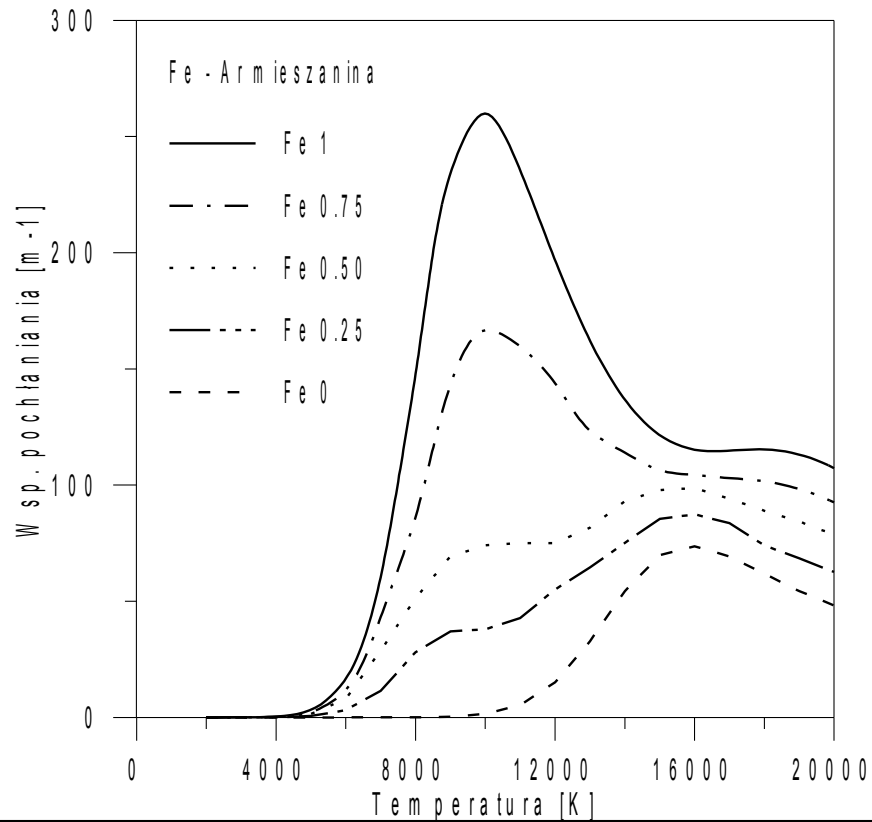
**Pole temperatur (a) i udział masowy par żelaza (b) w plazmie powstałej podczas spawania laserowego.** Gaz osłonowy **hel** o parametrach **25 m/s** i **300 K** na wylocie z dyszy. Pary metalu o parametrach **100 m/s** i **10 kK** na wylocie z kanału parowego. Moc lasera **1700 W**. Zewnętrzna izoterma **2000 K**. Odstęp izoterm **2000K**. Powierzchnia metalu i ognisko wiązki laserowej w  $z=0.01$  m.

Maksymalna temperatura około **18 kK**

Moc pochłonięta przez plazmę **86 W**, co stanowi około **5%**

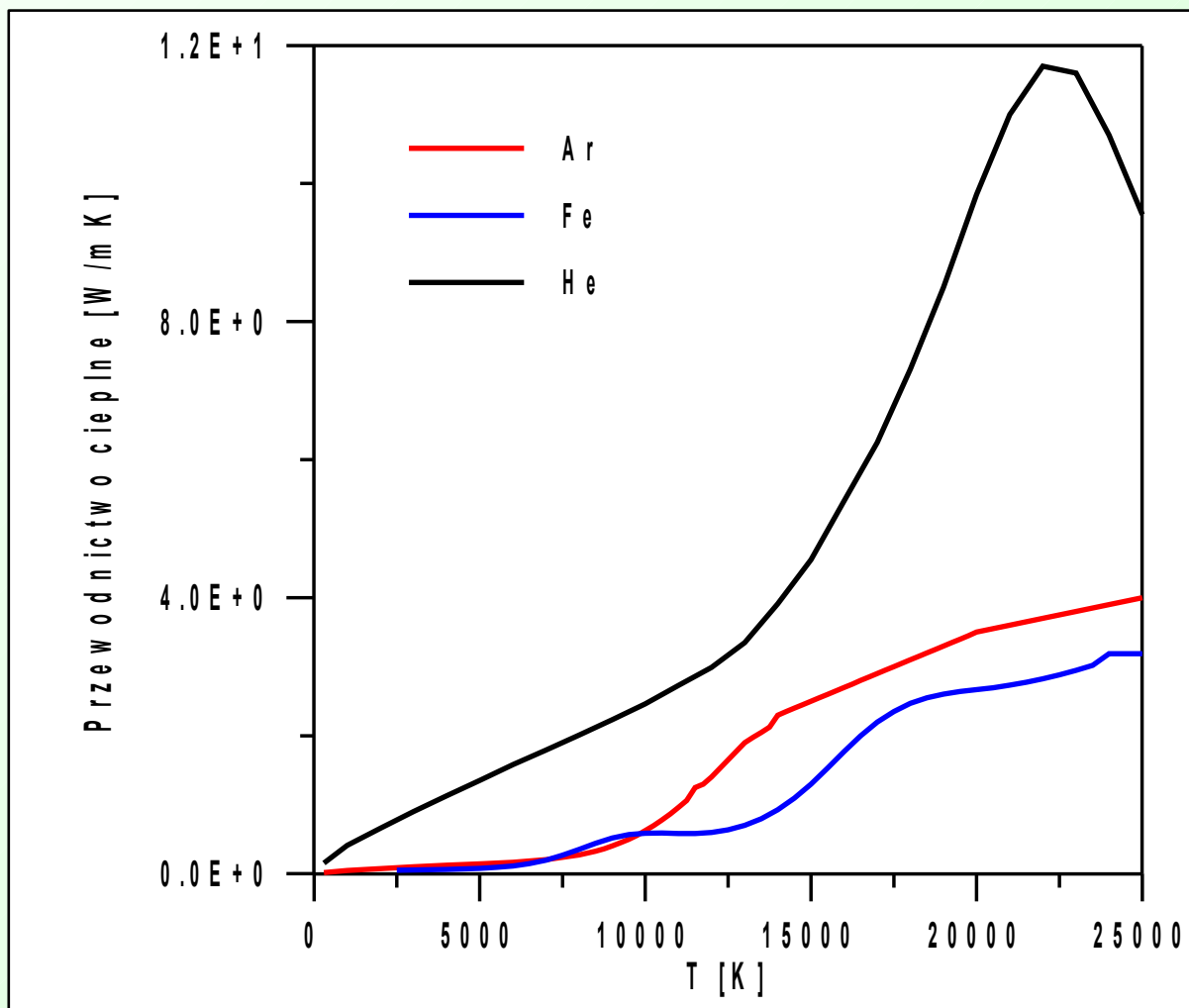
Moc wypromieniowana przez plazmę **53 W**

# Współczynnik pochłaniania

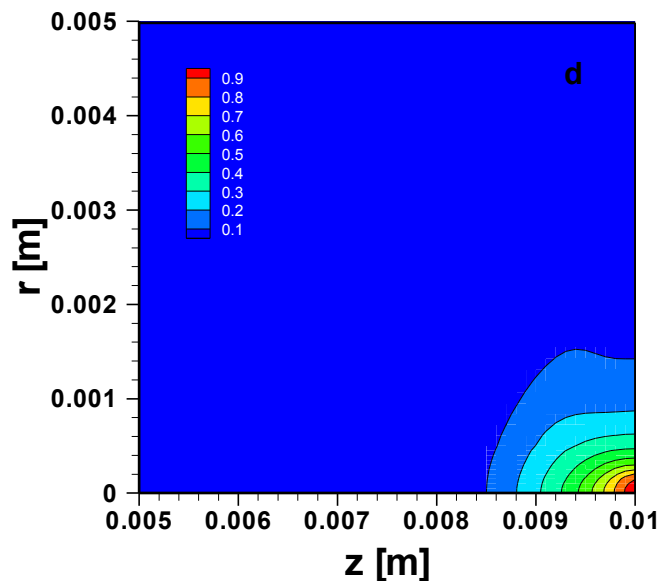
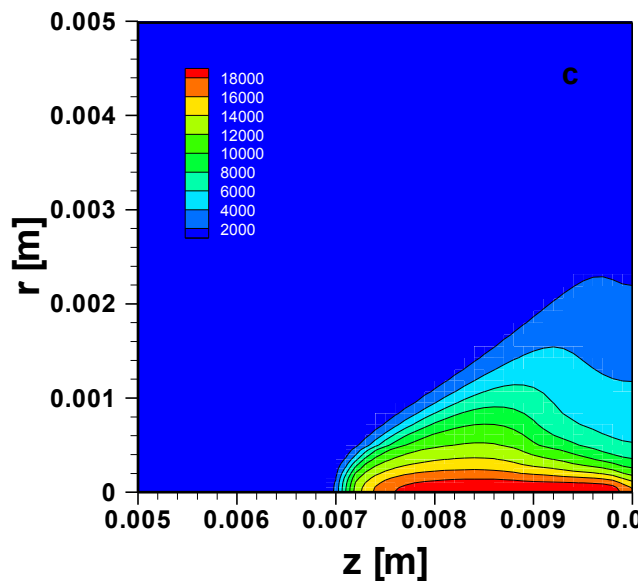
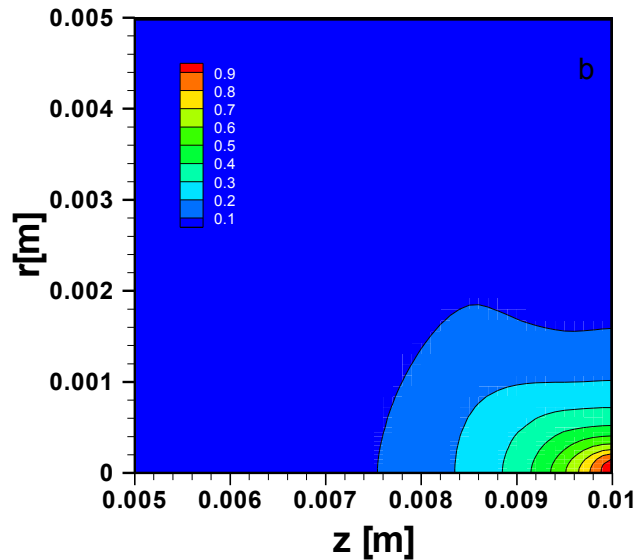
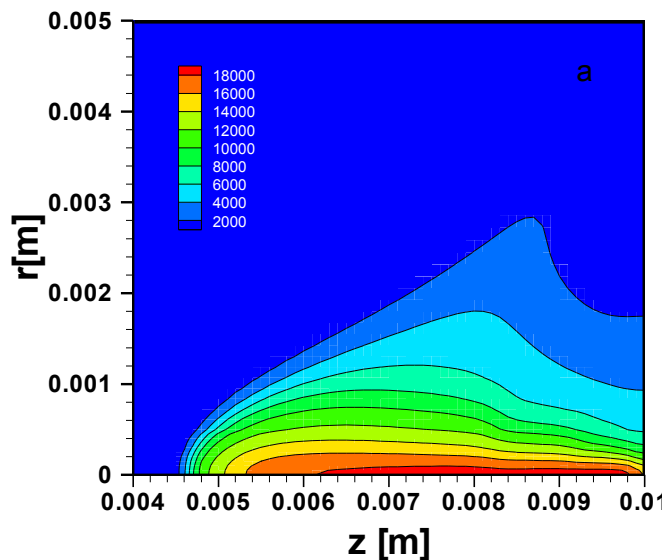


Potencjał jonizacji żelaza 7.87 eV, argonu 15.75 eV, helu 24.58 eV

# Przewodnictwo cieplne – wpływ na chłodzenie plazmy



# Wpływ prędkości gazu osłonowego na wylocie z dyszy



**Pole temperatur i ułamka masowego żelaza w plazmie powstającej podczas spawania laserowego.**

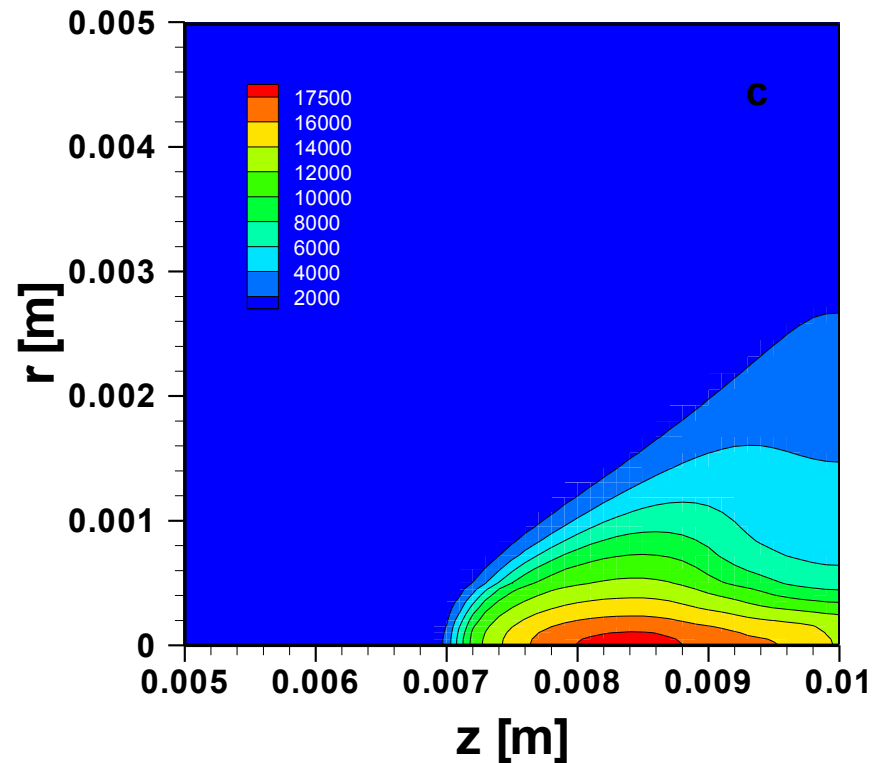
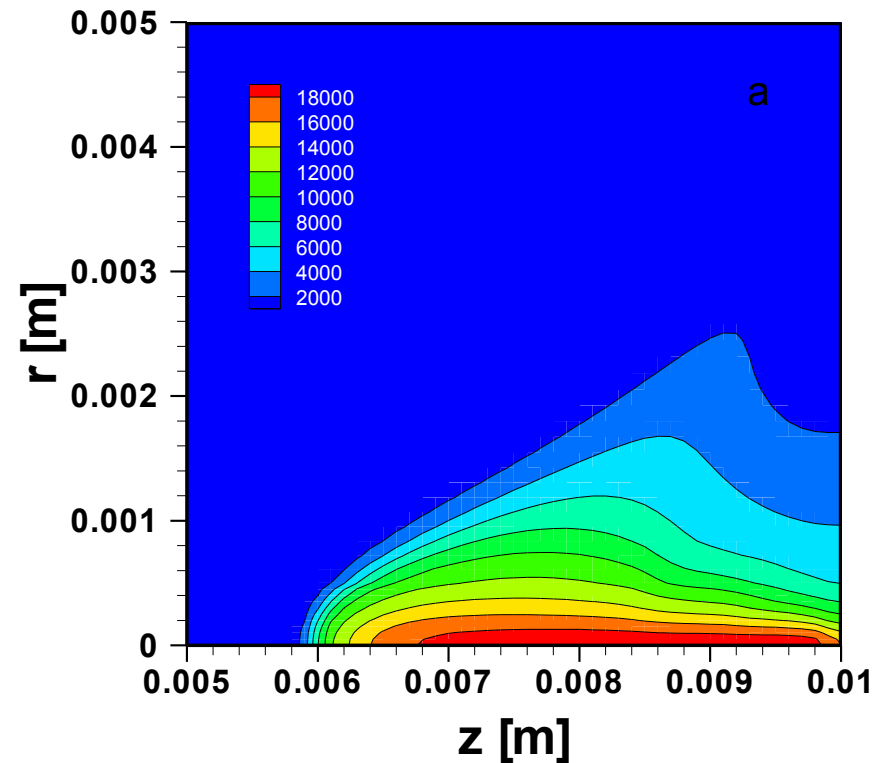
**Gaz osłonowy argon o parametrach 15 m/s (a,b), 40 m/s (c,d) i 300 K na wylocie z dyszy. Pary metalu o parametrach 10 kK i 100 m/s na wylocie z kanału parowego**

**Absorpcja**

**33 % dla 15 m/s,**

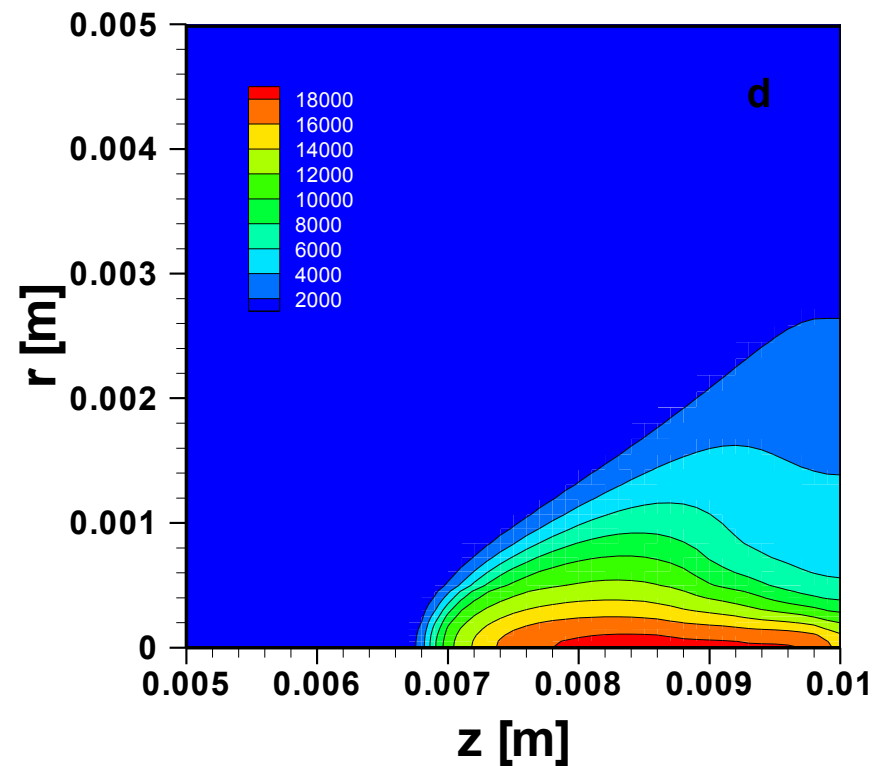
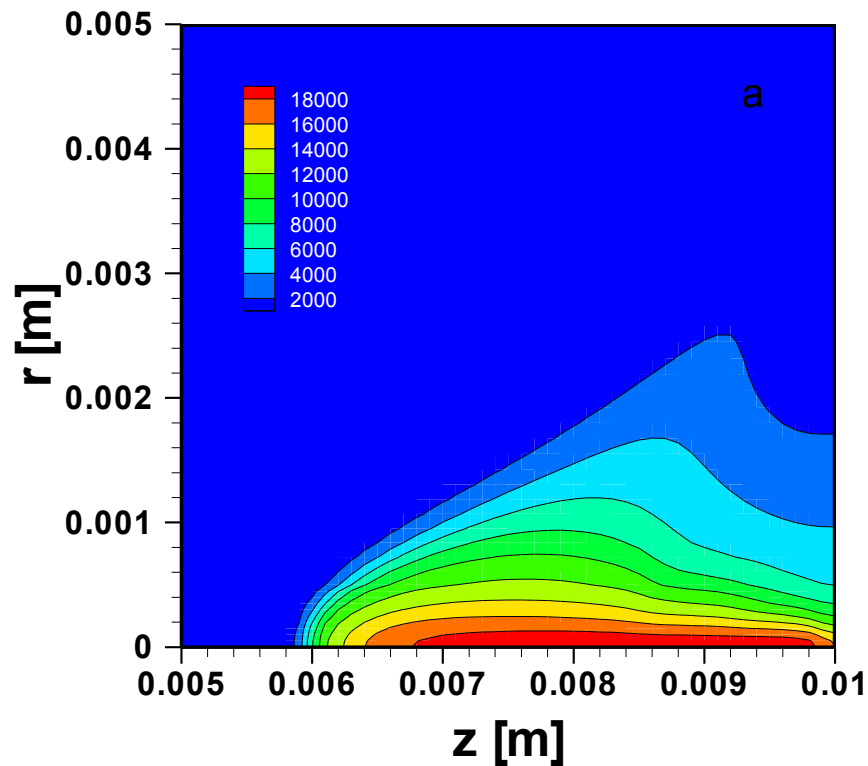
**19% dla 40 m/s**

# Zmiana średnicy wiązki



**Pole temperatur w plazmie powstającej podczas spawania laserowego. Gaz osłonowy argon o parametrach 25 m/s i 300 K na wylocie z dyszy. Pary metalu o parametrach 10 kK i 100 m/s na wylocie z kanału parowego. Moc lasera 1700 W. Średnica wiązki w ognisku 0.3 (a) i 0.6mm (c).**

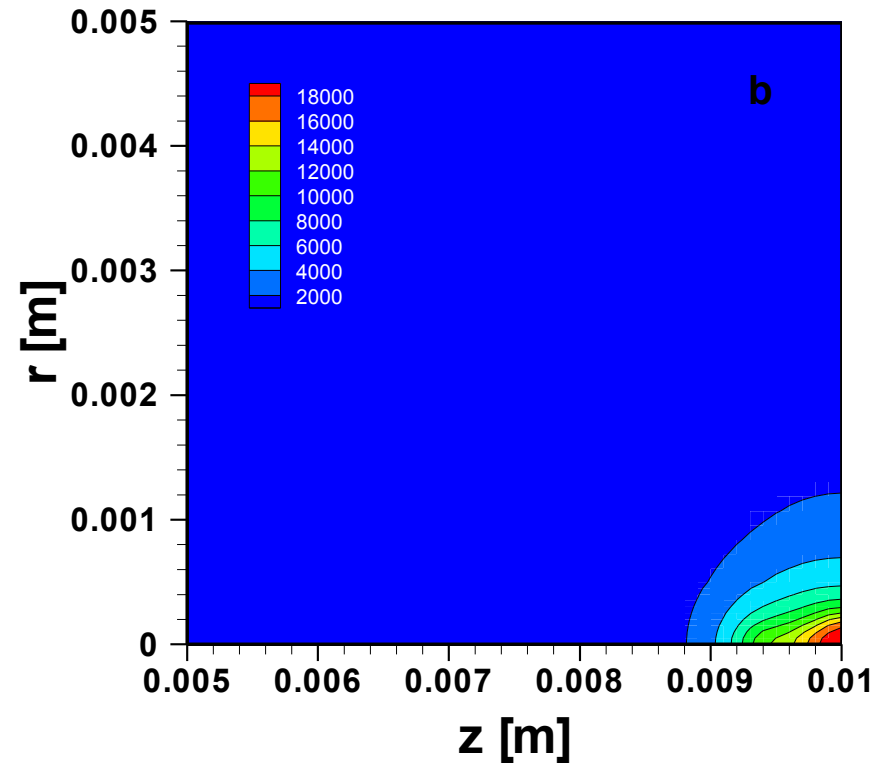
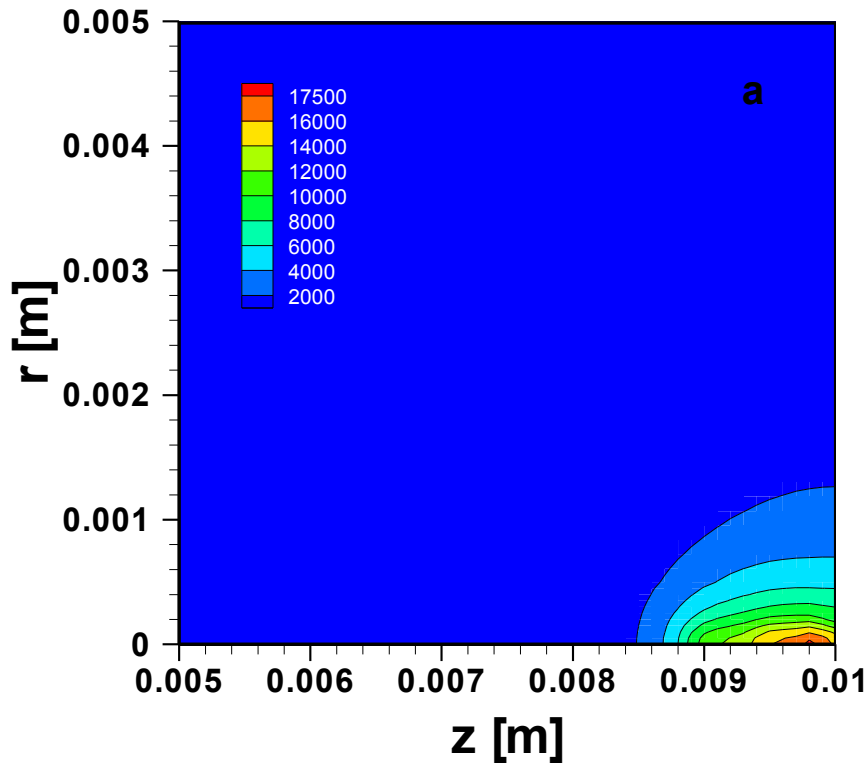
# Zmiana położenia ogniska wiązki



**Pole temperatur w plazmie powstającej podczas spawania laserowego. Gaz osłonowy argon o parametrach 25 m/s i 300 K na wylocie z dyszy. Pary metalu o parametrach 10 kK i 100 m/s na wylocie z kanału parowego. Moc lasera 1700 W. Położenie ogniska na powierzchni próbki (a), 1.5 mm (d).**

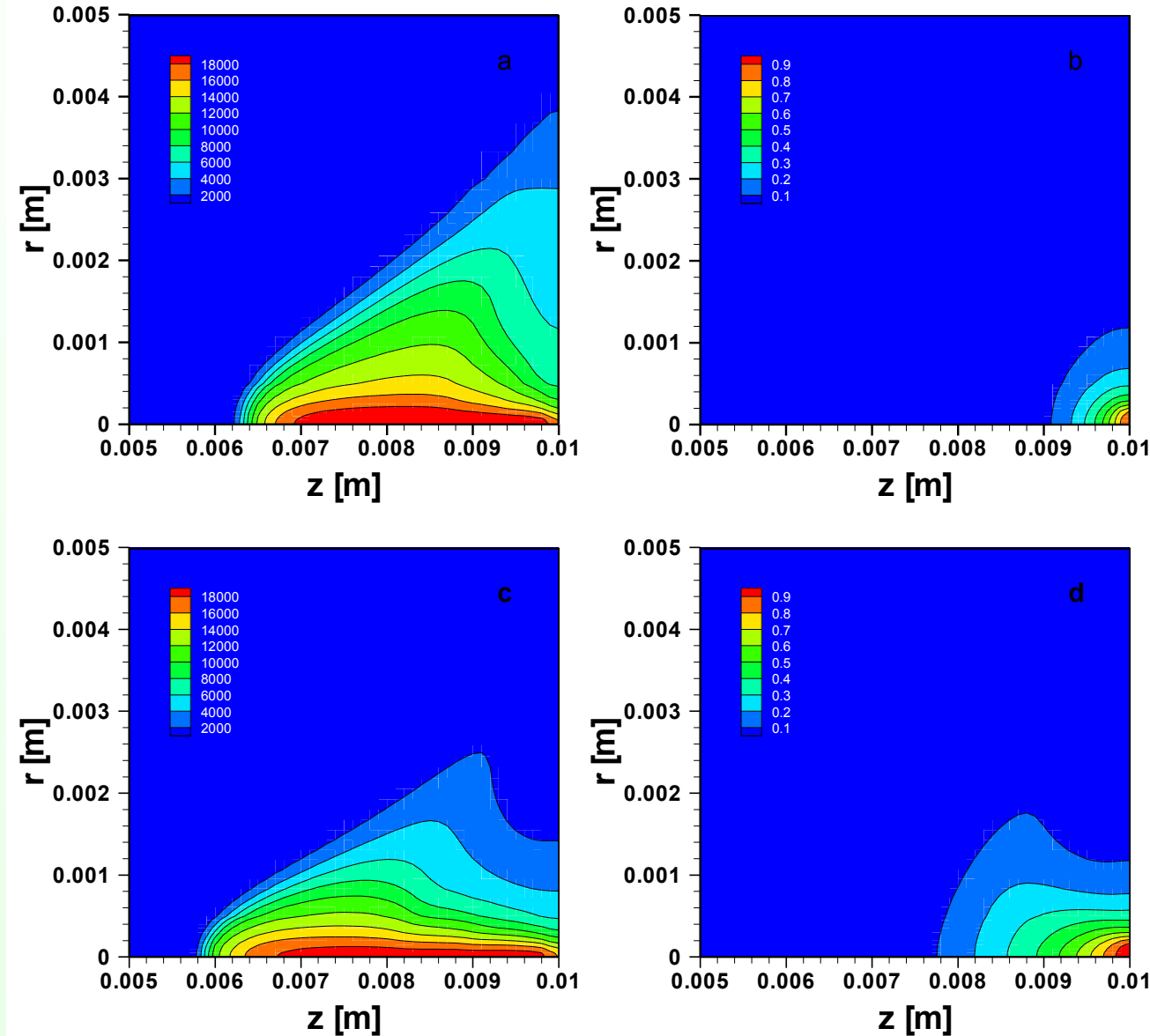


# Wpływ temperatury par metalu



Pole temperatur w plazmie powstającej podczas spawania laserowego. Gaz osłonowy hel o parametrach 25 m/s i 300 K na wylocie z dyszy. Pary metalu o parametrach 100 m/s i **5 kK** (a), **20 kK** (b), na wylocie z kanału parowego

# Wpływ prędkości par metalu na wylocie z kanału parowego



**Pole temperatur (a, c) i ułamka masowego żelaza (b,d) w plazmie powstającej podczas spawania laserowego. Gaz osłonowy argon o parametrach 25 m/s i 300 K na wylocie z dyszy. Pary metalu o parametrach 10 kK i 50 m/s (a,b), 150 m/s (c,d), na wylocie z kanału parowego**

# Podsumowanie

- W przypadku gdy gazem osłonowym jest argon istnieją dwie plazmy – plazma argonu i plazma metalu, natomiast gdy gazem osłonowym jest hel tylko jedna – plazma żelaza
- Absorpcja ~ 26 % w przypadku Ar ( w tym argon 11.5 %);  
5% w przypadku He (tłumaczy różnice w głębokości przetopienia ~25%)
- Ponieważ promieniowanie obłoku plazmowego jest powszechnie używane do kontroli procesu spawania, uzyskany wynik jest bardzo ważny. Pokazuje on, że w przypadku, kiedy gazem osłonowym jest argon należy monitorować zarówno świecenie żelaza jak i argonu
- Obszar plazmy zmniejsza się gdy prędkość par na wylocie z kanału parowego maleje, natomiast zwiększa gdy maleje prędkość gazu osłonowego na wylocie z dyszy
- Obszar plazmy zmniejsza się gdy promień wiązki  $w_0$  w ognisku zwiększa się, oraz gdy przesuwamy ognisko pod powierzchnie próbki
- Wyniki są w dobrej zgodności z eksperymentem wymiary plazmy Fe-He są zgodne z wynikami eksperymentalnymi. Plazma Fe-Ar jest nieco większa (w eksperymencie wysokość plazmy 2-3 mm). Absorpcja jest większa niż szacowana z eksperymentu (Fe-He 1%, Fe-Ar 10%, Ar 5% - ale wyniki eksperymentalne są otrzymywane z uśrednionych przestrzennie gęstości elektronów i temperatury)
- Praca została opublikowana w T.Mościcki, J. Hoffman, Z. Szymański; Modelling of Plasma Plume Induced During Laser Welding J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 685-692