

Sponsor główny:



## Program Seminarium:

### 10.00 – 10.10

Otwarcie – **Andrzej Ciepiela**,  
Polska Unia Dystrybutorów Stali

### 10.10 – 10.50

Stale odporne na korozję w budownictwie:  
wybór gatunku i prawidłowe stosowanie  
– **Benoît Van Hecke**, Euro Inox

### 10.50 – 11.10

Przetapianie laserowe powierzchni stali  
odpornych na korozję – **Miroslaw Bonek**,  
**Zbigniew Brytan**, Instytut Materiałów  
Inżynierskich i Biomedycznych

### 11.10 – 11.40

Stal nierdzewna w przemyśle budowlanym  
– **David Holland**, **Izabela Dors-Wolak**,  
Ugine & Alz Arcelor Mittal Group

### 11.40 – 12.00

Dachy i ściany z blach nierdzewnych-  
sposób wykonania dachu Sądu w Antwerpii  
– **Paweł Fiszer**, ME Polska

### 12.00 – 12.15

Przerwa kawowa

### 12.15 – 13.45

Obróbka powierzchni stali odpornych na  
korozję po procesie spawania  
– **Thomas Van Os**, VECOM

### 13.45 – 14.10

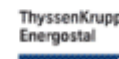
Metody spawania stali nierdzewnych  
i ich wpływ na jakość spoin i powierzchni  
złączy spawanych  
– **Jerzy Niagaj**, Instytut Spawalnictwa

### od 14.10

Panel dyskusyjny

Poczęstunek

Partnerzy:





POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH  
Wydział Mechaniczny Technologiczny

*Przetapianie laserowe powierzchni  
stali odpornych na korozję*

*Dr inż. Mirosław BONEK*

*Dr inż. Zbigniew BRYTAN*

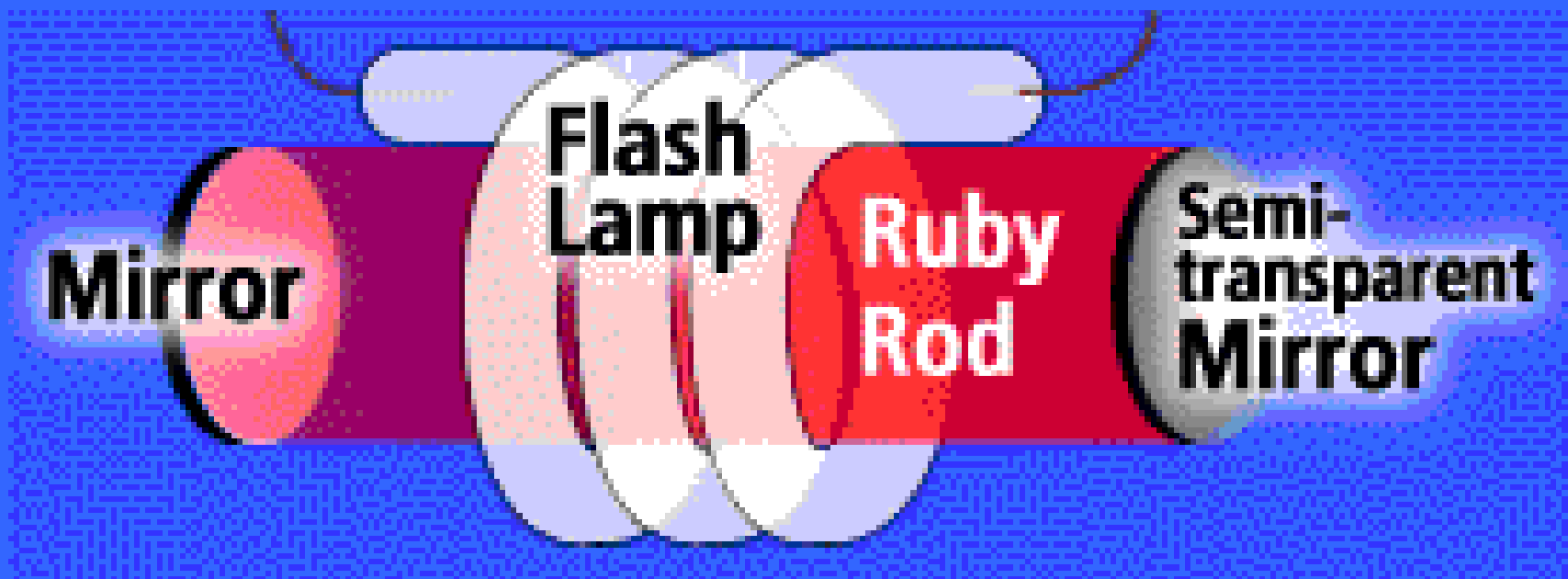
*Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych*

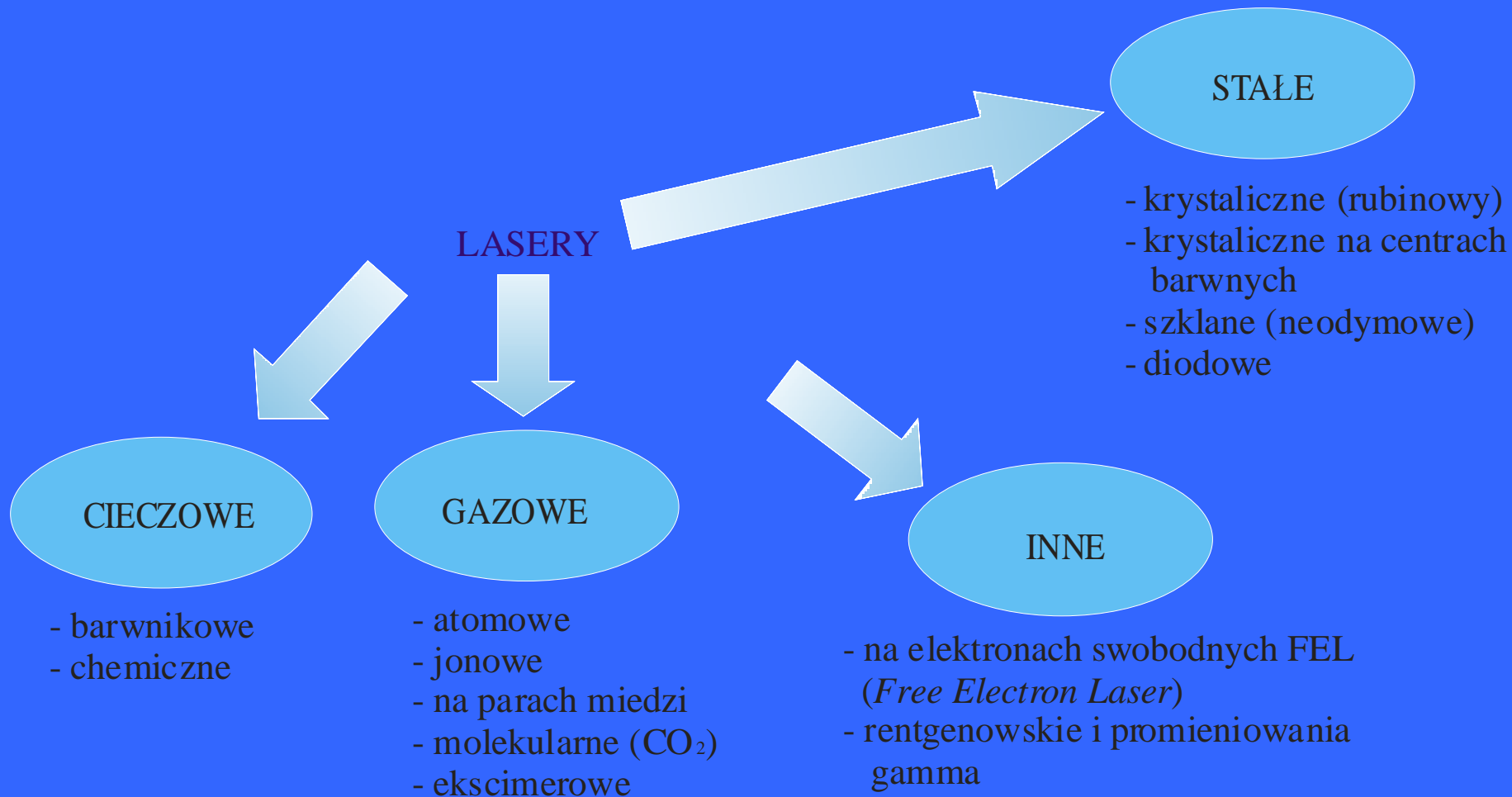


## Cel pracy

*Celem niniejszej pracy jest zbadanie mechanizmów strukturalnych i wybranych własności warstw wierzchnich uzyskanych w wyniku obróbki stali 316L wytworzonej metodą konwencjonalną i metoda metalurgii proszków laserem diodowym dużej mocy HPDL.*

**LASER** – **L**ight **A**mplification by **S**timulated Emission of Radiation – oznacza wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania.







## Laser diodowy dużej mocy HPDL

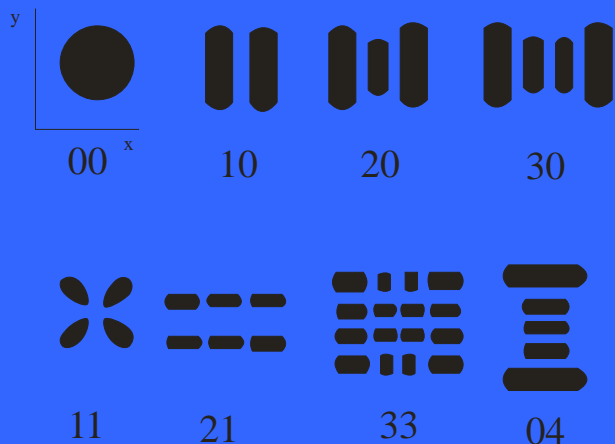
Lasery diodowe dużej mocy HPDL (*High Power Diode Laser*) są obecnie najnowocześniejszym źródłem energii i dopiero od roku 1998 są wykorzystywane na skalę przemysłową w inżynierii materiałowej (w obróbce metali, a także materiałów polimerowych).



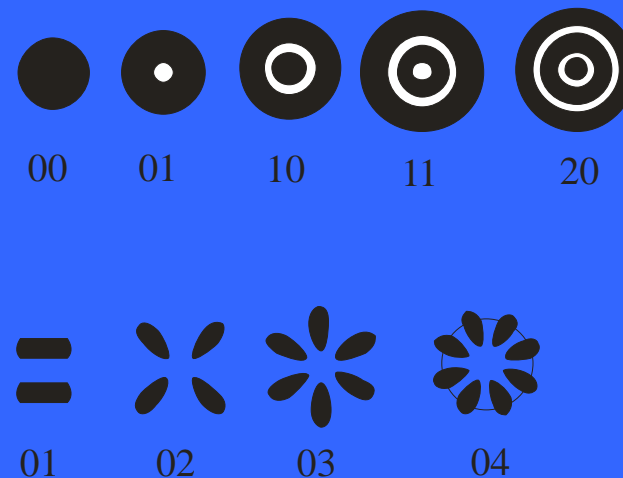
## Zaletą tych laserów jest to, że:

- umożliwiają uzyskanie **prostokątnego, kwadratowego, liniowego lub kołowego** kształtu ogniska wiązki laserowej,
- charakteryzują się **kontrolowanym rozkładem energii** w miejscu ogniskowania przy gęstości mocy do  $10^5$  W/cm<sup>2</sup>,
- są **stabilne**,
- są **łatwe w sterowaniu**,
- charakteryzują się wysokim **współczynnikiem absorpcji promieniowania**,
- mają **niewielkie gabaryty**,
- **nie wymagają** prowadzenia wiązki laserowej przez **złożone układy optyczne** powodujące straty energii od 10 do 30%,

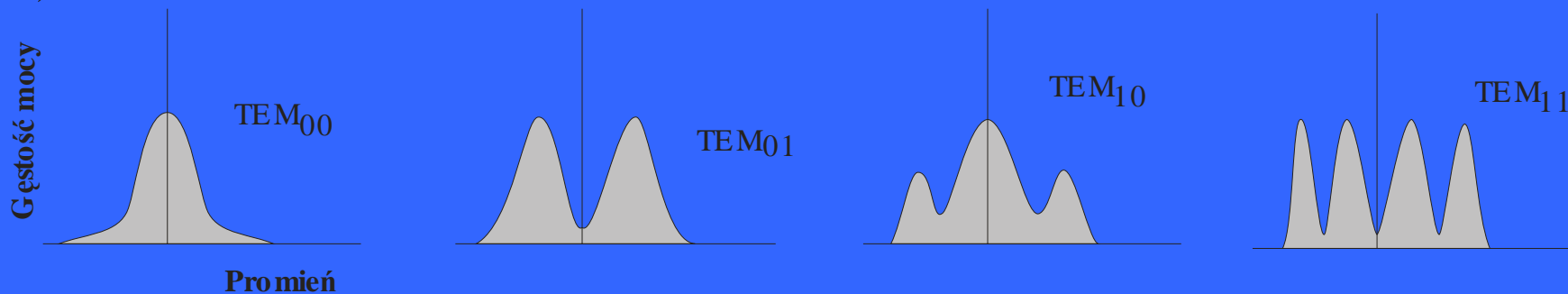
a)



b)

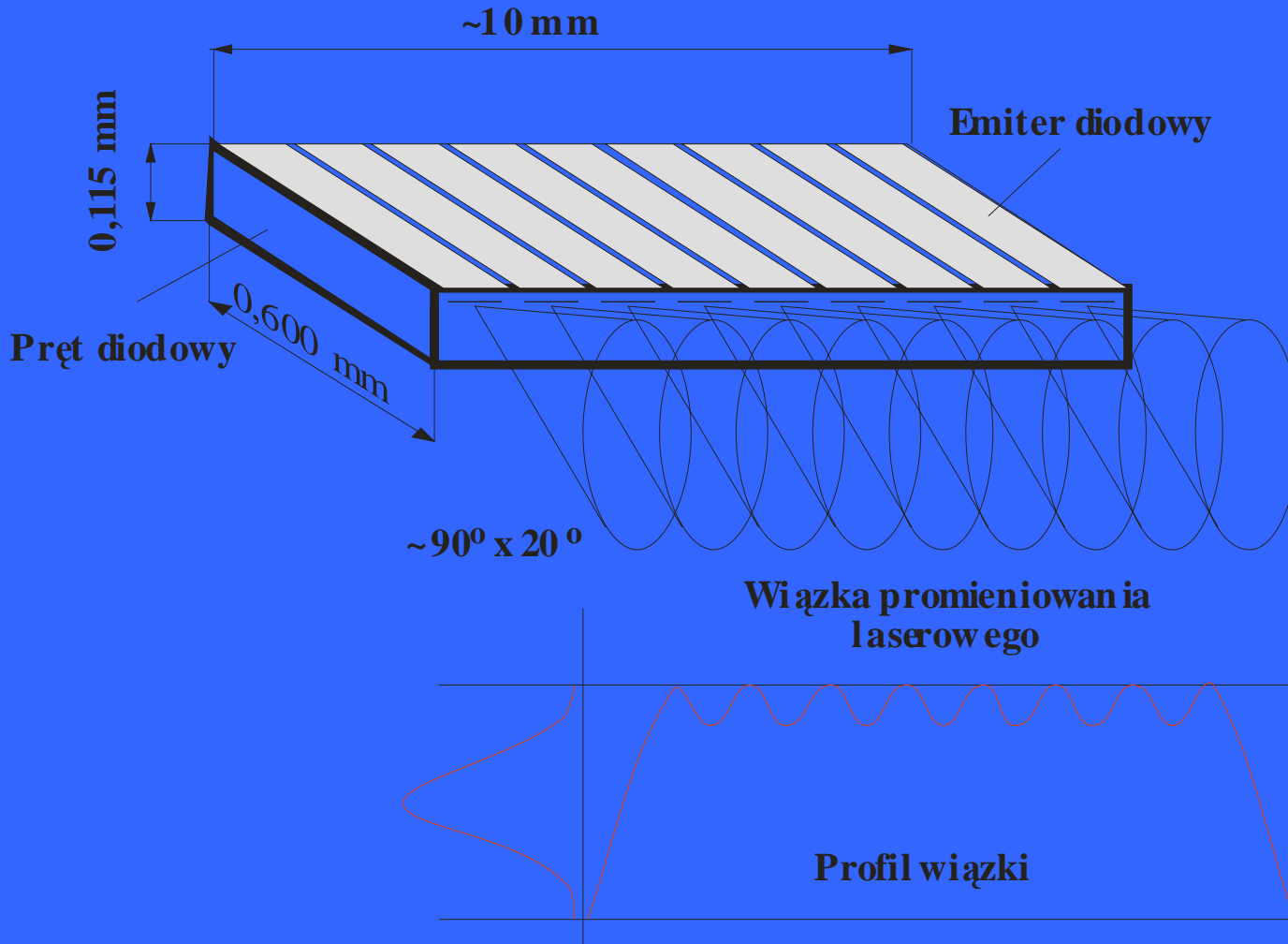


c)



Rodzaje modów poprzecznych lasera o symetrii prostokątnej (a) i osiowej (b), oraz przykłady rozkładów energii w ognisku wiązki laserowej (c)

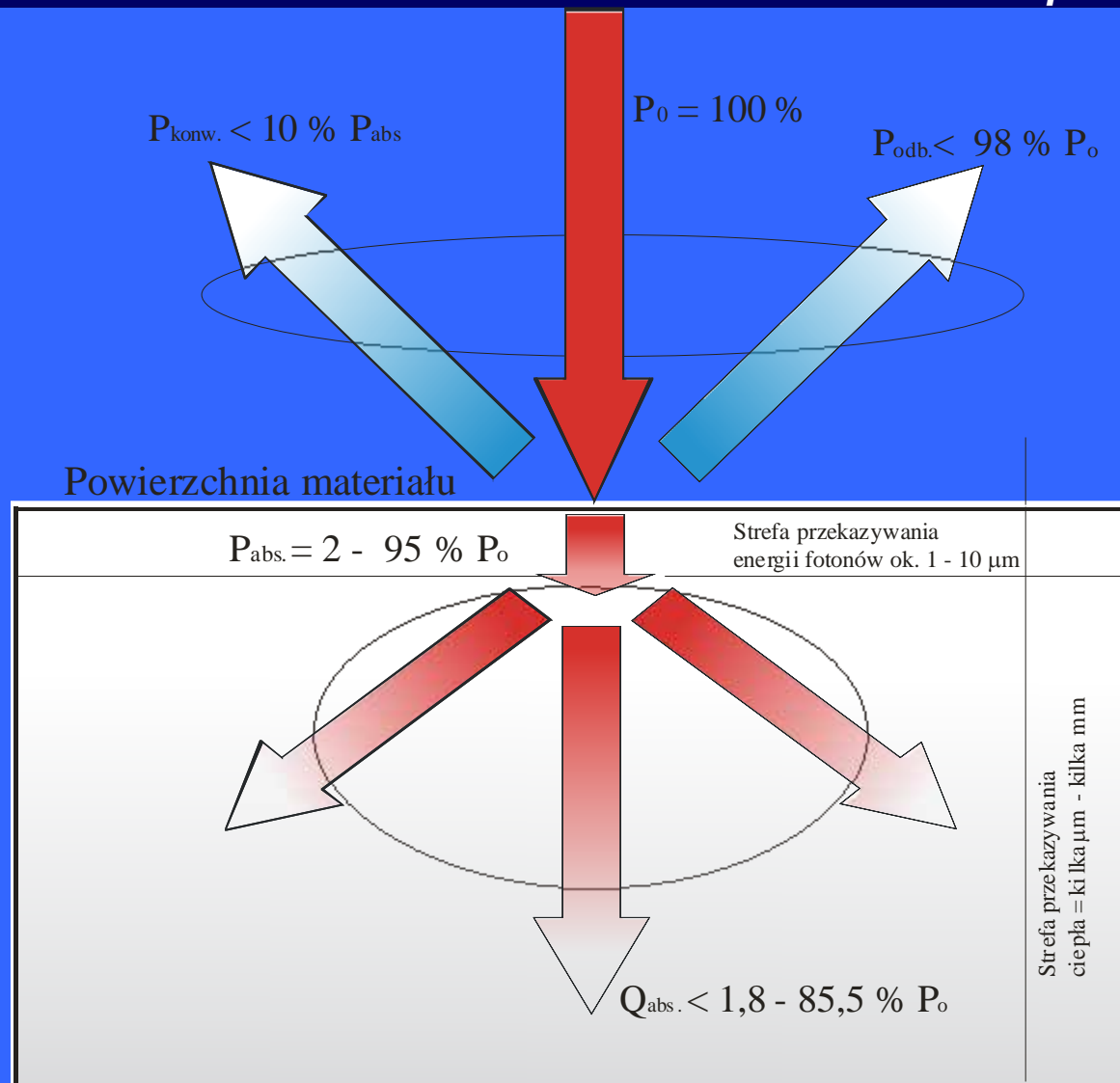




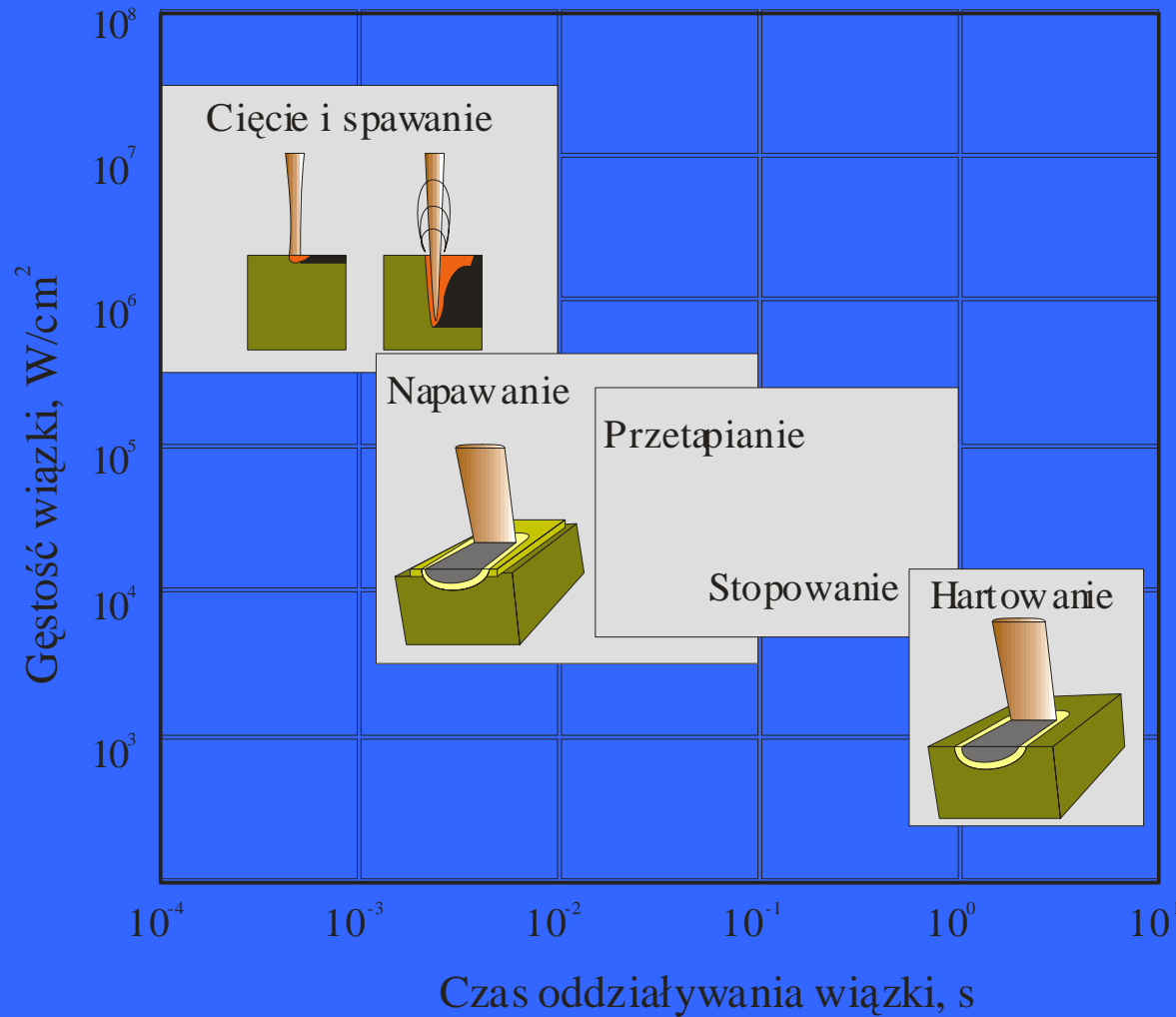
Wymiary pręta diodowego i emisja promieniowania



**Zastosowanie laserów w inżynierii materiałowej**



Schemat oddziaływania promieniowania laserowego na materiał

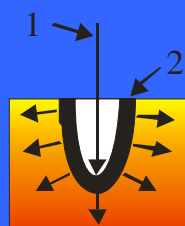


**Porównanie gęstości mocy wiązki lasera i czasu oddziaływania wiązki na materiał w różnych procesach technologicznych**

W trakcie procesu

Po zakończeniu procesu

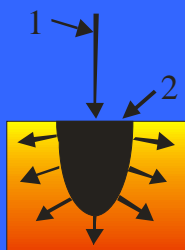
Powierzchniowa gęstość mocy  
potrzebna do odparowania materiału  
(dla stali  $10^5 \text{ W/cm}^2$ )



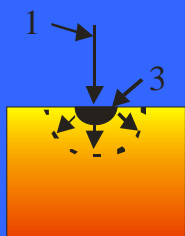
Przeływ  
ciepła



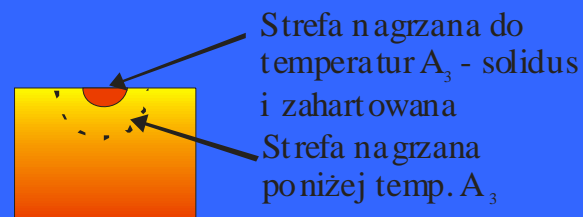
Powierzchniowa gęstość mocy  
potrzebna do przetopienia  
(dla stali  $10^4 \text{ W/cm}^2$ )



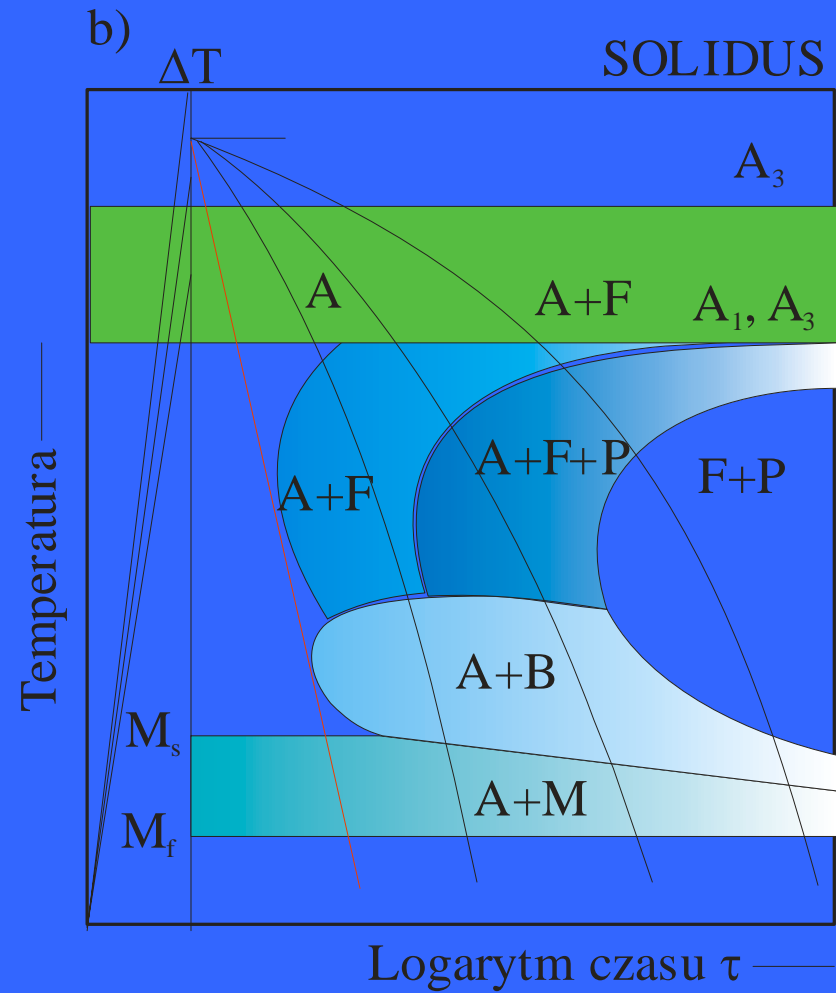
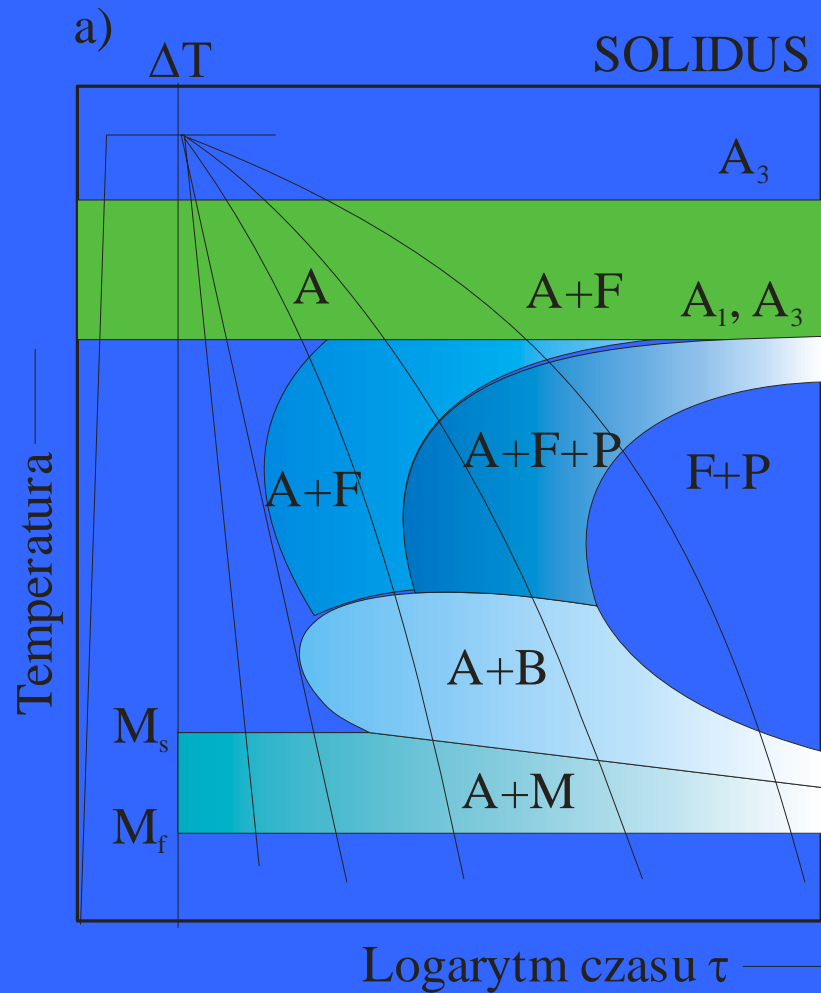
Przeływ  
ciepła



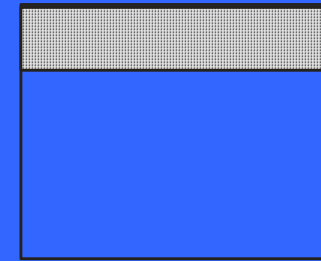
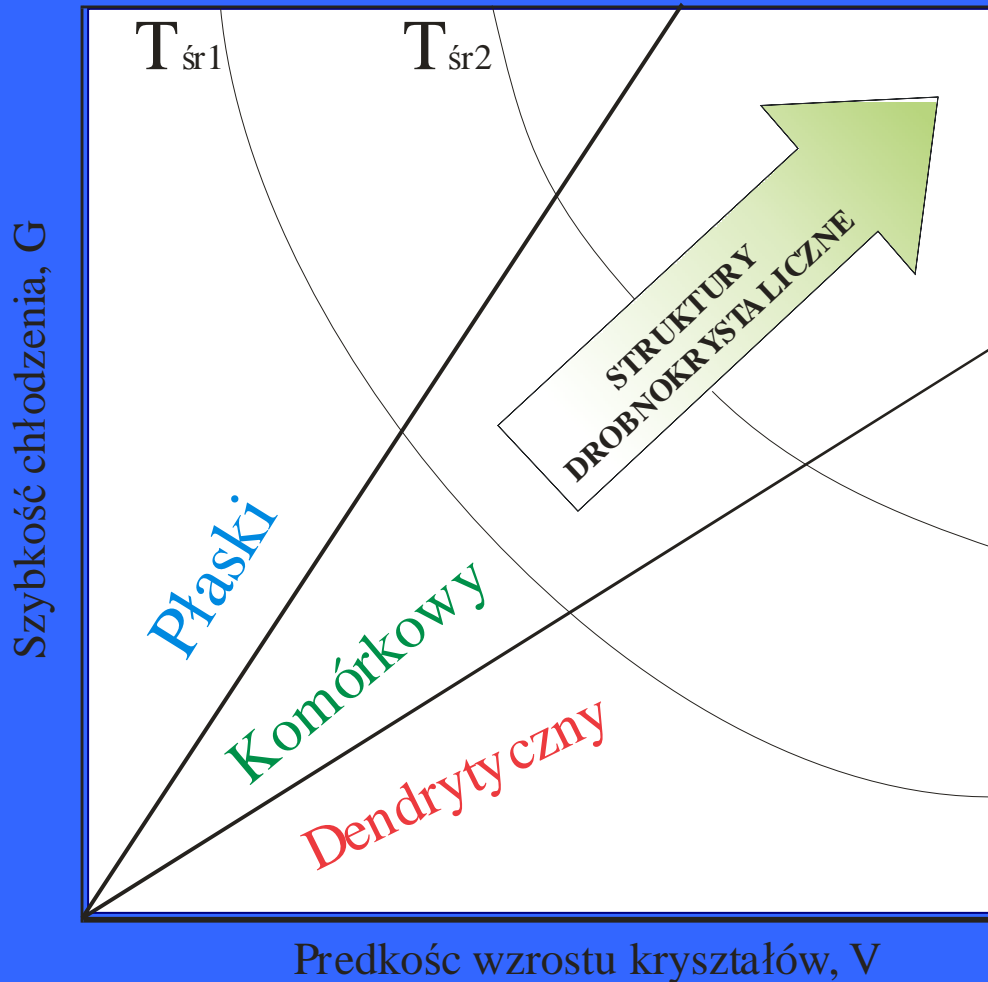
Przeływ  
ciepła



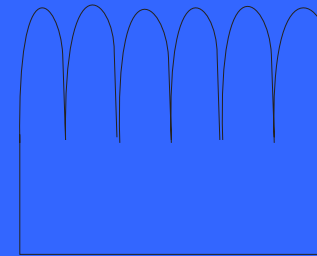
- 1 Wiązka laserowa
- 2 Materiał przetopiony
- 3 Lokalne nagrzanie powierzchni



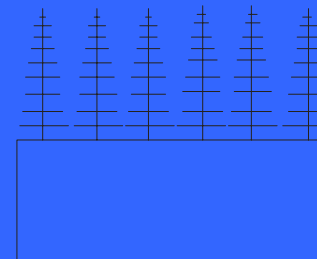
Schemat hartowania a) konwencjonalnego, b) laserowego



Płaski front  
krystalizacji  
(bez segregacji)



Komórkowy front  
krystalizacji  
(segregacja)



Dendrytowy front  
krystalizacji  
(segregacja)

Rodzaj frontu krzepnięcia w zależności od gradientu temperatury  
i szybkości frontu krystalizacji

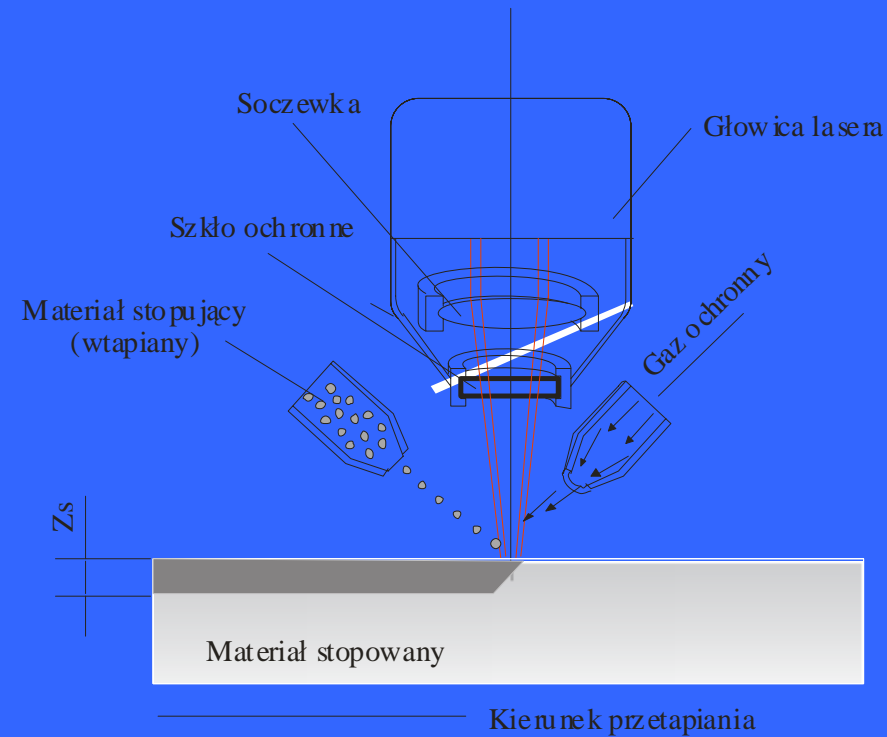
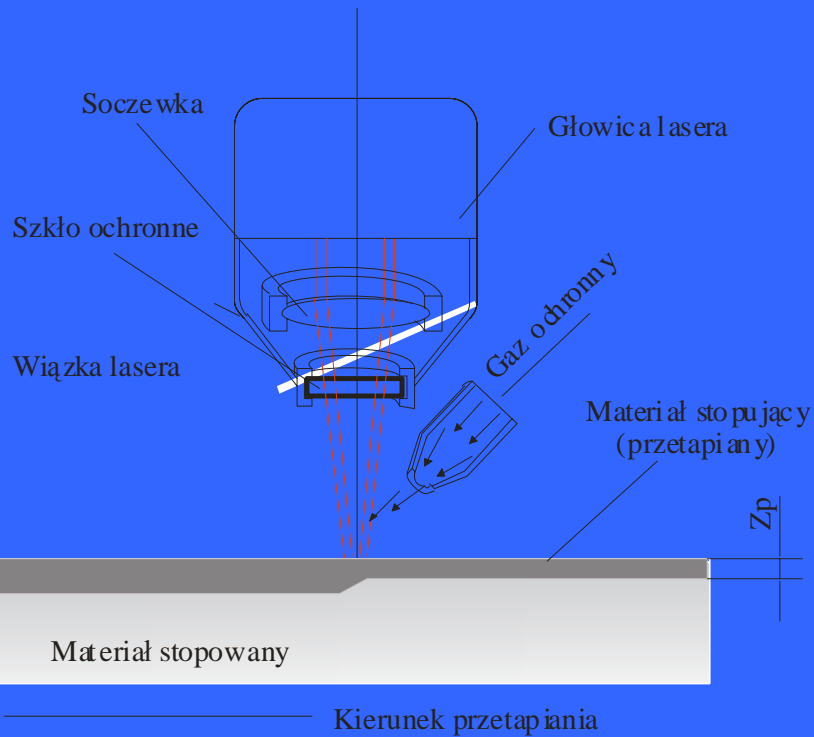
**Materiałami wzbogacanymi są głównie:**

- **stale niskowęglowe,**
- **stale niskostopowe,**
- **stale odporne na korozję,**
- **stale narzędziowe,**
- **żeliwa,**
- **metale nieżelazne np. Ti, Al, Cu.**

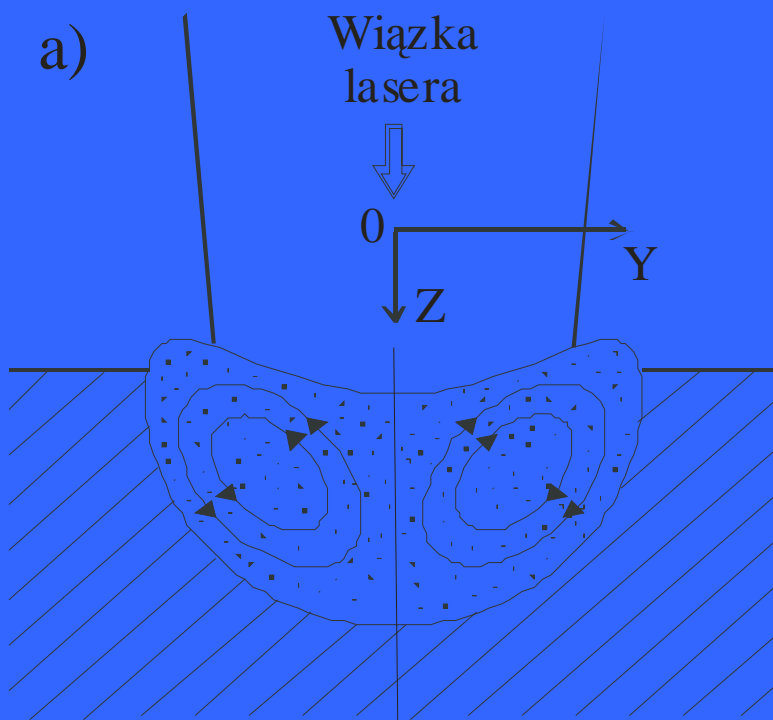
**Podział najczęściej stosowanych materiałów stopujących jest następujący:**


- **niemetale – C, N<sub>2</sub>, Si, B – w procesach laserowego nawęglania, azotowania, krzemowania i borowania,**
- **metale – Cr, Co, Mn, Nb, Ni, Mo, W, Ta, V,**
- **kompozycje pierwiastków – B-C, B-Si,**
- **stopy metali – Co-W, CrTi, FeCr, C-Cr-Mn, Al-Cr-C-W,**
- **węgliki – TiC, NbC, VC, TaC, WC,**
- **tlenki – Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.**

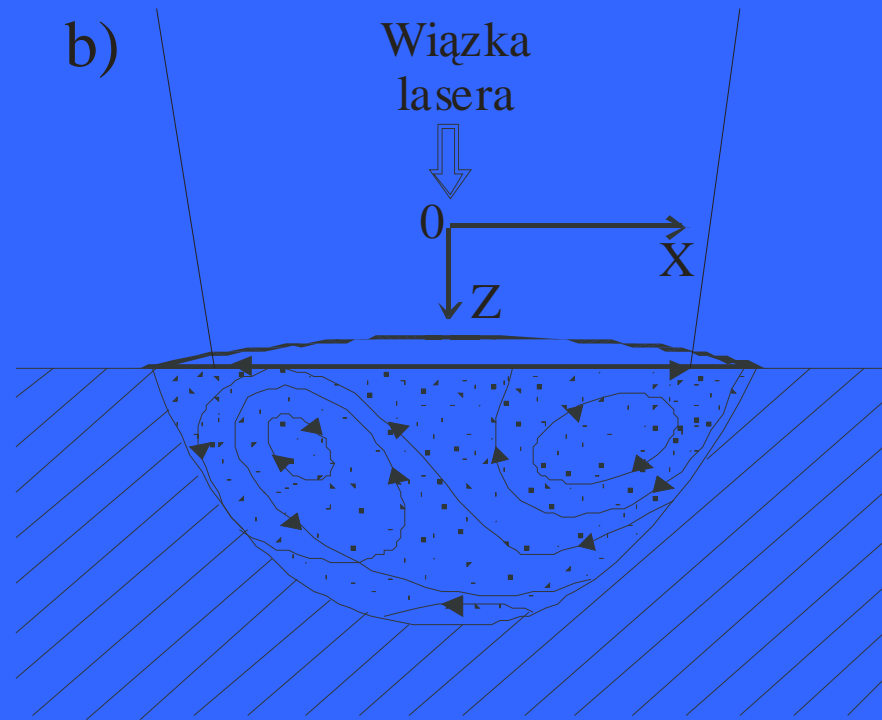




**Wzbogacanie warstwy wierzchniej przez: a) przetapianie, b) wtapianie;  
zs – grubość warstwy stopowanej, zp – grubość warstwy stopującej**



  
Kierunek ruchu próbki

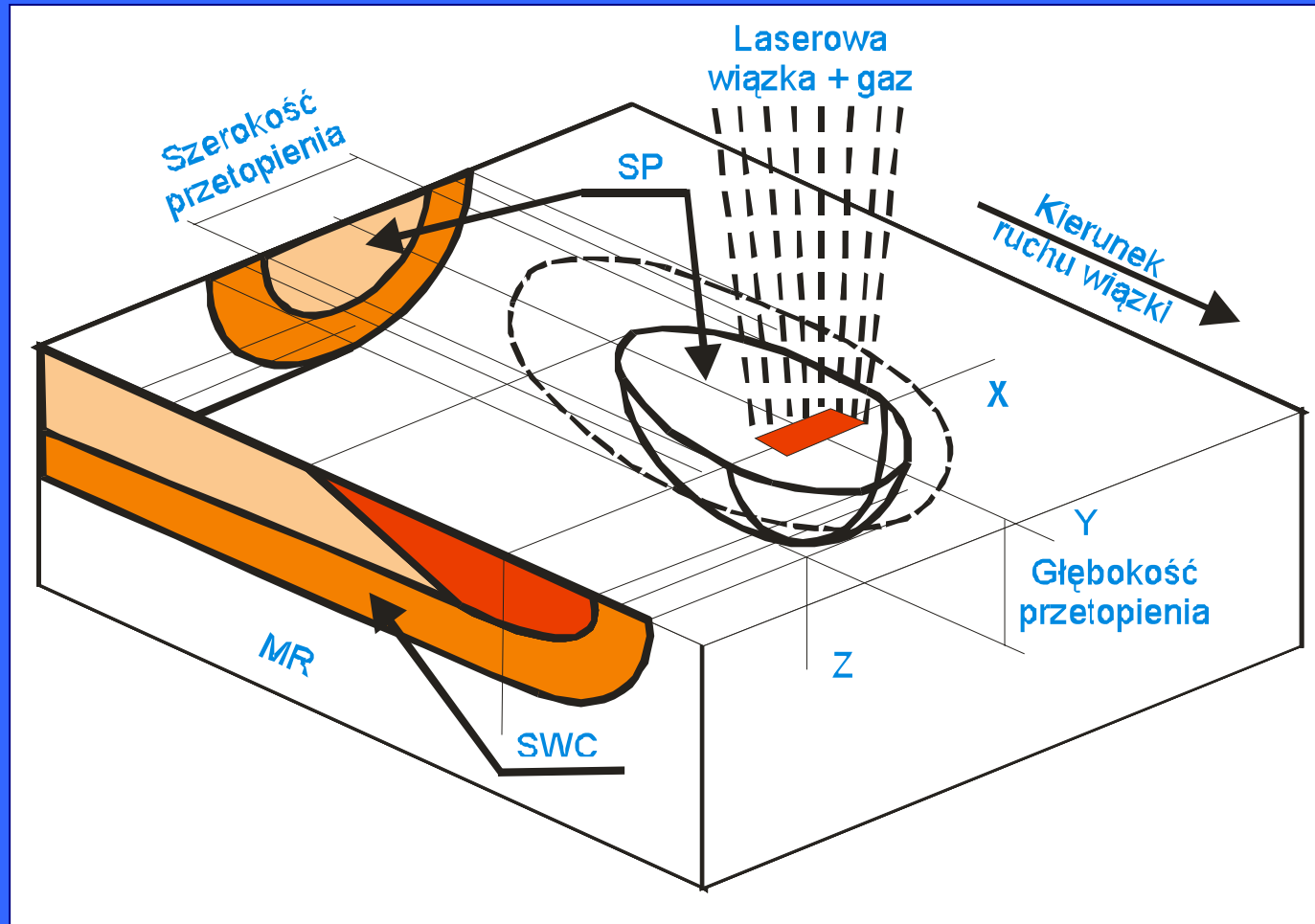


  
Kierunek ruchu próbki

**Schemat ruchów konwekcyjnych podczas laserowego przetapiania w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przemieszczania się materiału**

## Schemat zmian strukturalnych zachodzących w warstwie wierzchniej stali po przetapianiu laserem

SP – strefa przetopiona, SWC – strefa wpływu ciepła, MR – materiał rodzimy



## Przebieg badań

Badania wykonano na próbkach ze stali austenitycznej chromowo – niklowo-molibdenowej wykonanej metoda konwencjonalną objętej normą ISO 5832-1 oraz na stali austenitycznej chromowo – niklowo - molibdenowej otrzymaną w procesie metalurgii proszków objętej normą PN-EN 10088. Składy chemiczne badanych stali zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Stężenie masowe pierwiastków w próbkach badanych stali

Oznaczenie stali wg PN-EN	Gatunek stali wg AISI	Stężenie masowe pierwiastków, %								
		C	Mn	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
X2CrNiMo18-15-3 <sup>1)</sup>	316L	0,03	1,19	0,002	0,17	17,8	14,7	2,7	0,07	reszta
X2CrNiMo17-12-2 <sup>2)</sup>		0,02	-	-	0,9	16,4	13	2,5	-	reszta

<sup>1)</sup> Konwencjonalna stal austenityczna Cr-Ni-Mo; <sup>2)</sup> Spiekana stal austenityczna Cr-Ni-Mo



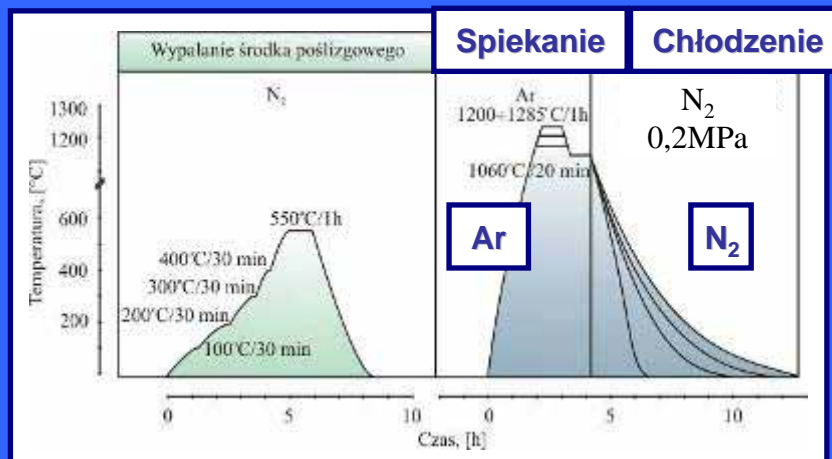
## Konwencjonalna stal odporna na korozję

Próbki ze stali austenitycznej konwencjonalnej zostały dostarczone w postaci blachy walcowanej. Stal poddano przesycaniu w temperaturze 950°C przez 2 godziny z następnym chłodzeniem w wodzie.

## Spiekana stal odporna na korozję

Próbki ze spiekanej stali austenitycznej zostały wykonane z proszku stali odpornej na korozję X2CrNiMo17-12-2, który prasowano pod ciśnieniem 800 MPa i następnie spiekano w piecu próżniowym typu TAV SintVac w temperaturze 1260°C przez 60 minut oraz chłodzono bezpośrednio z temperatury spiekania w atmosferze azotu o ciśnieniu 0,2 MPa.

Cykl spiekania badanych stali



Piec próżniowy





## Stanowisko do przetapiania laserowego z zastosowaniem lasera diodowego dużej mocy HPDL ROFIN DL 020

*Dane techniczne lasera diodowego  
HPDL Rofin DL 020*

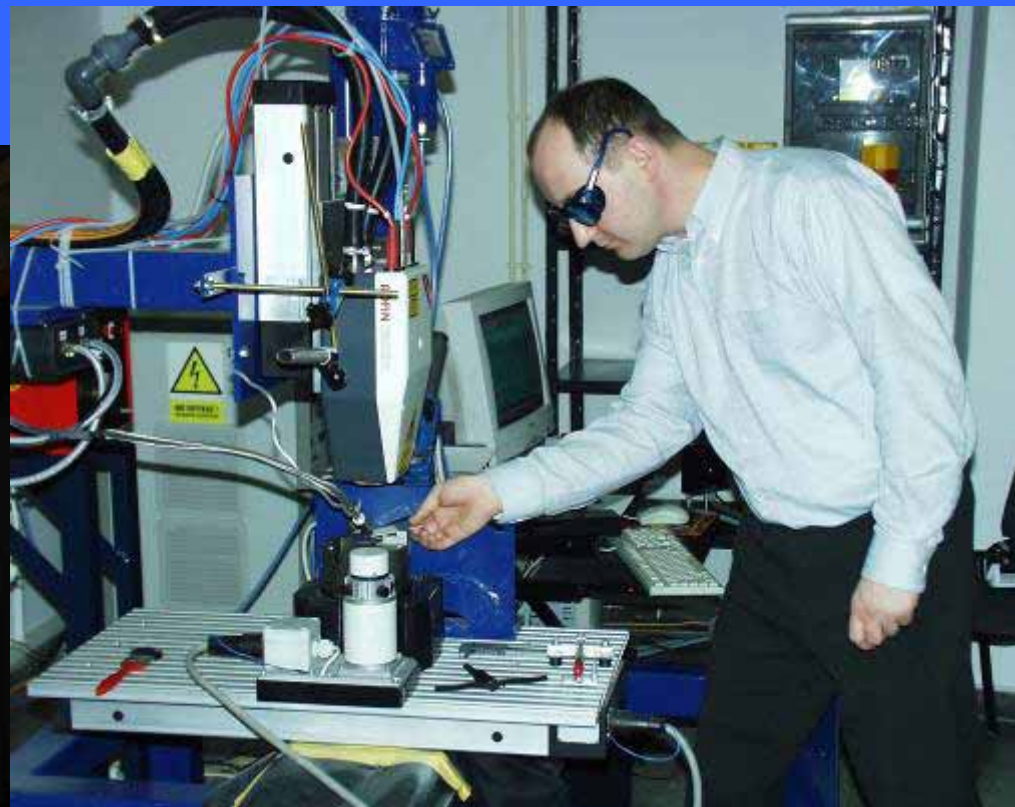
Długość fali promieniowania laserowego, nm	$808 \pm 5$
Moc wyjściowa wiązki laserowej (promieniowanie ciągłe), W	2500
Zakres mocy, W	100-2500
Długość ogniskowa wiązki laserowej, mm	82 / 32
Wymiary ogniska wiązki laserowej, mm	1,8 x 6,8
Zakres gęstości mocy w płaszczyźnie ogniska wiązki laserowej, kW/cm <sup>2</sup>	0,8-36,5





## **Stanowisko do przetapiania laserowego z zastosowaniem lasera diodowego dużej mocy HPDL ROFIN DL 020**

Laser dodatkowo jest wyposażony w stolik roboczy obrotowy i poruszający się w płaszczyźnie XY, dyszę gazu ochronnego, głowicy laserowej, układu zasilania i chłodzenia, oraz system komputerowy sterujący i kontrolujący pracę lasera jak także położenie stolika roboczego.





## ***Przetapianie laserowego powierzchni stali***

- laserowe przetapianie ze stałą prędkością 0,5 m/min,
- Zmienna moc wiązki laserowej w zakresie 0,7 do 2,1 kW,
- Wymiary wiązki lasera zogniskowanej na powierzchni materiału wynosiły 1,6x6,8 mm,

Wstępne próby przetapiania stali wykazują wyraźny wpływ parametrów procesu przetapiania, w szczególności mocy wiązki laserowej na kształt lica ściegu. W analizowanym zakresie mocy lasera zaobserwowano regularny i płaski kształt lica bez podtopień o stosunkowo dużej gładkości. W zależności od mocy lasera otrzymano różne szerokości przetopienia.

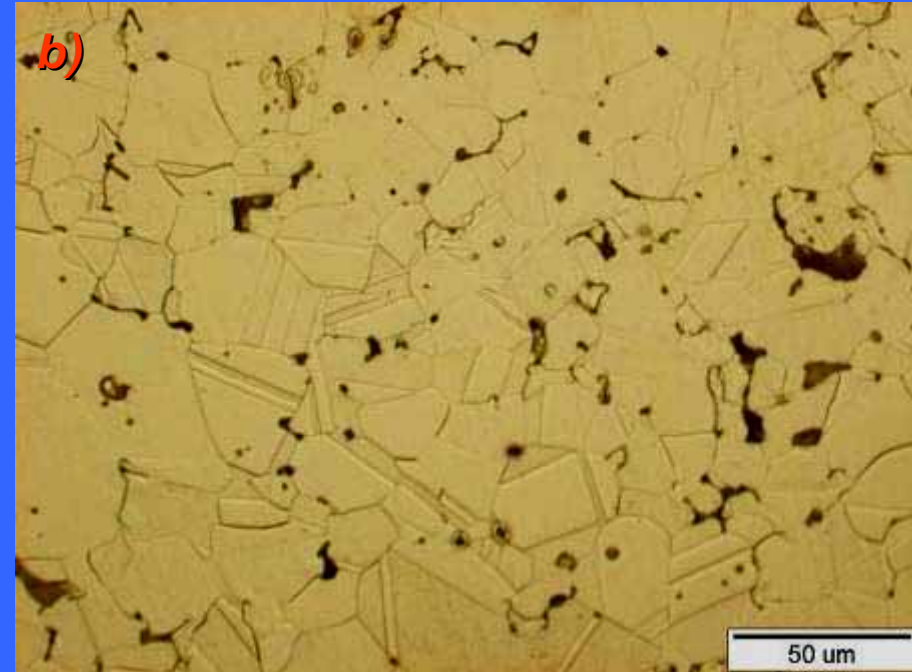
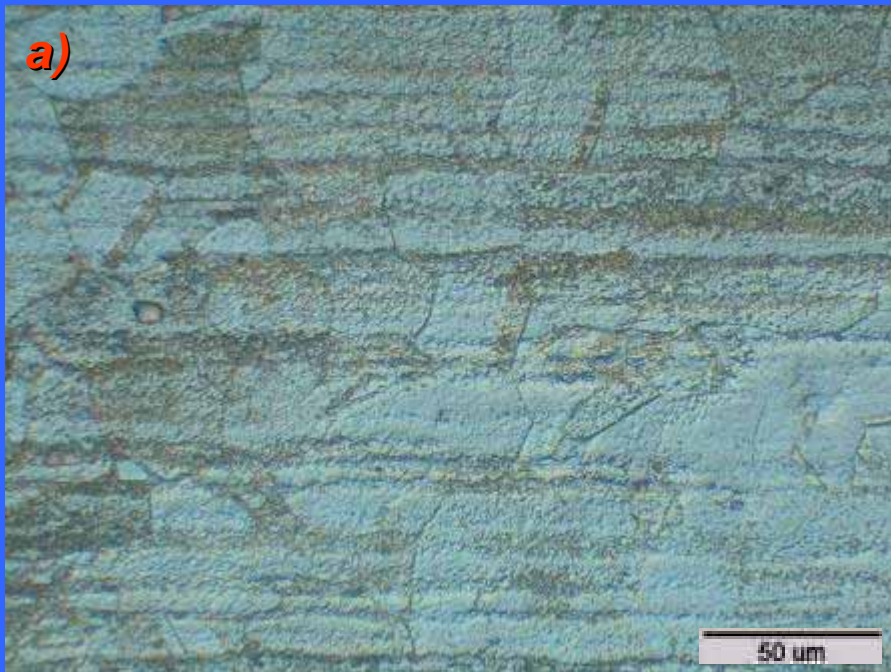


## ***Przebieg badań własnych***

*W celu ustalania własności stali w stanie wyjściowym i po przetapianiu laserowym, wykonano następujące badania:*

- **badania struktury z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej,**
- **badania składu fazowego z wykorzystaniem analizy rentgenowskiej,**
- **topografii powierzchni przetopionej z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej,**
- **szerokości lica ściegu,**
- **chropowatość powierzchni,**
- **twardości przetopionych warstw,**
- **badania korozji elektrochemicznej w 1M roztworze NaCl,**

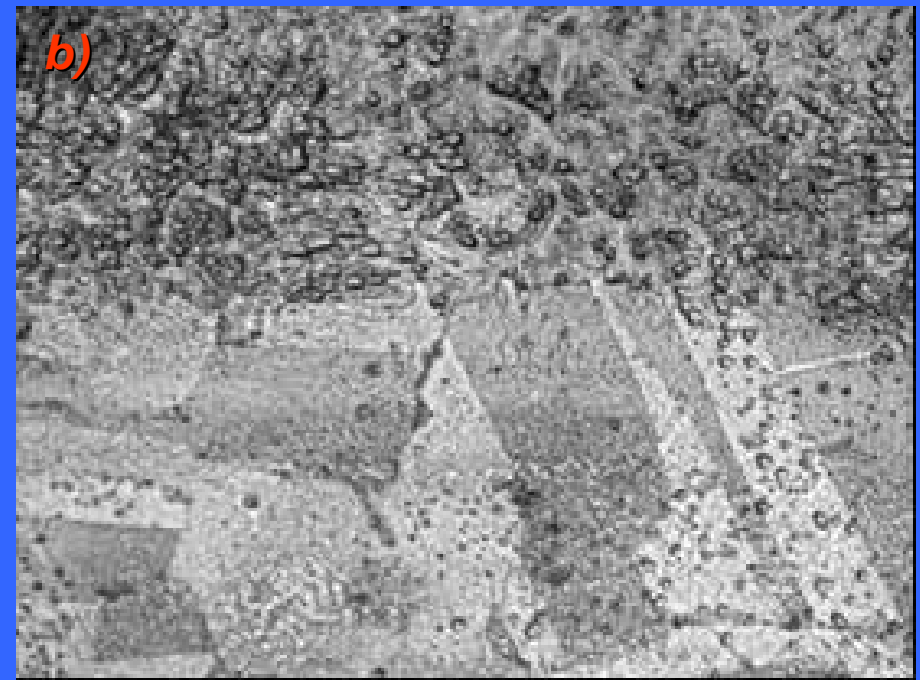
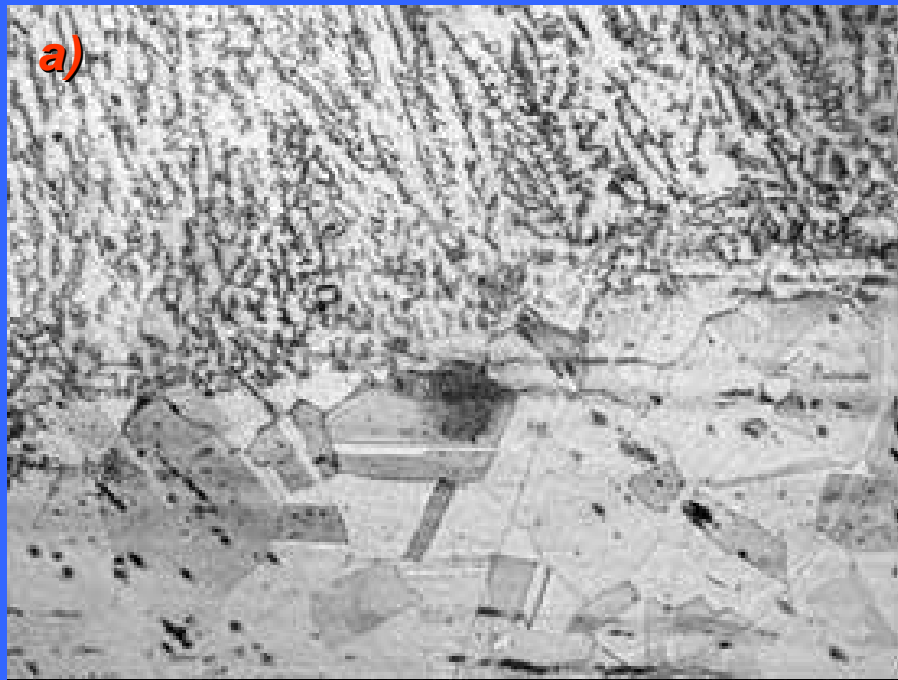
## Struktura konwencjonalnej i spiekanej stali austenitycznej



Struktura badanej stali austenitycznej a) konwencjonalnej, b) spiekanej

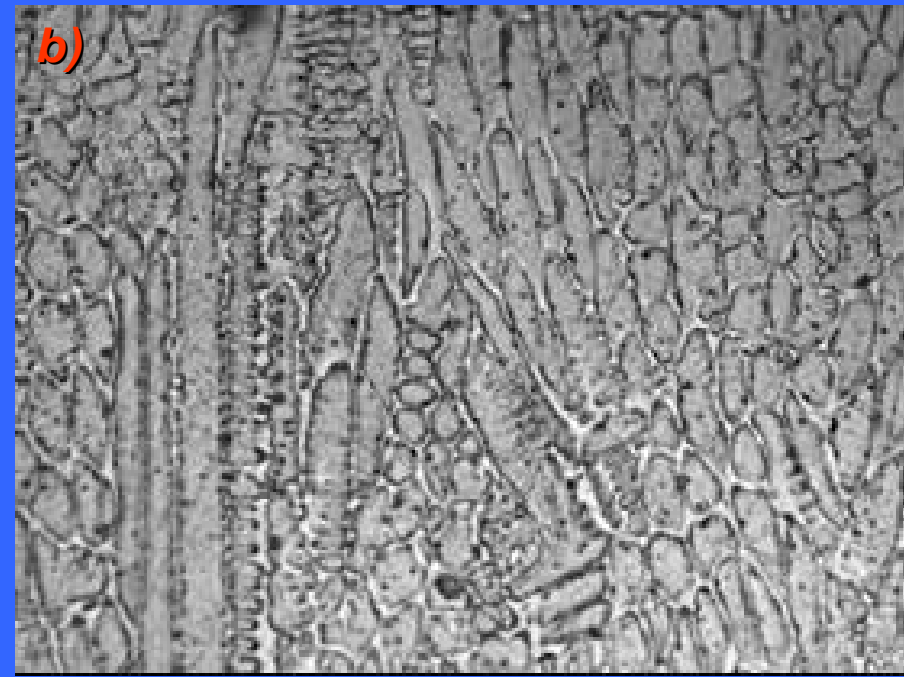
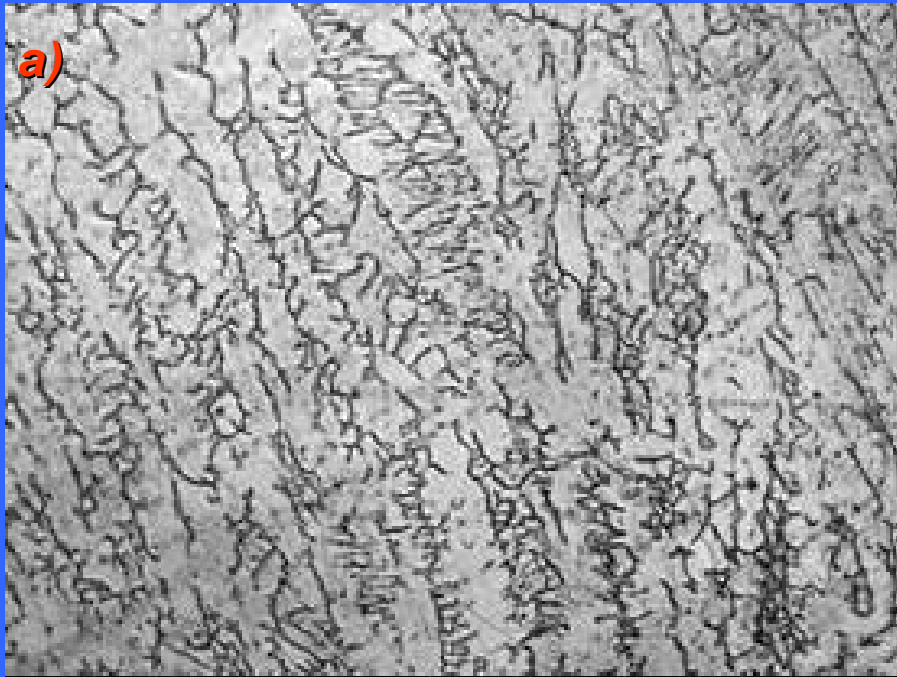
## Struktura stali przetopionej laserowo

Struktura stali konwencjonalnej: a) brzeg przetopienia warstwy wierzchniej stali po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 2,1 kW, powiększenie 500x; b) granica strefy przetopionej warstwy wierzchniej po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 1,1 kW, powiększenie 1000x

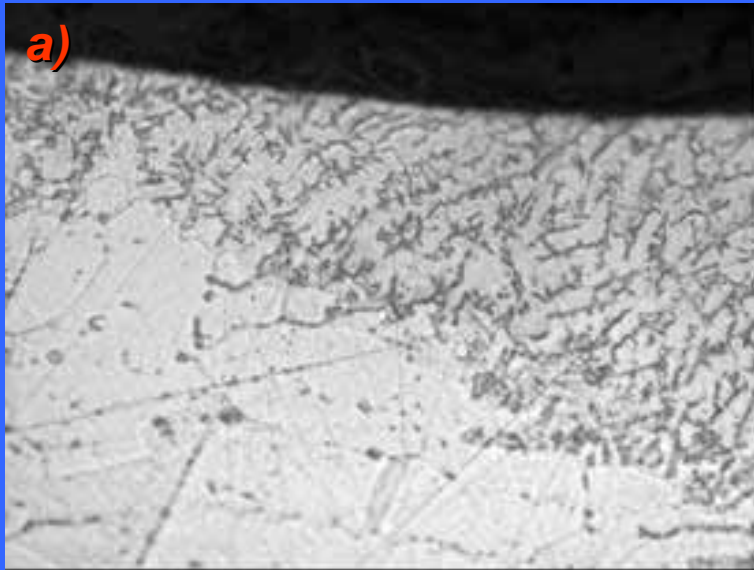


## Struktura stali przetopionej laserowo

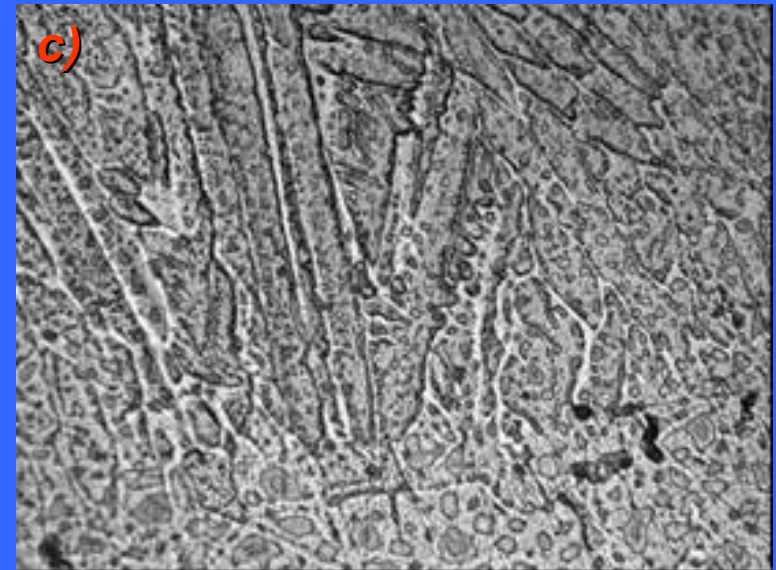
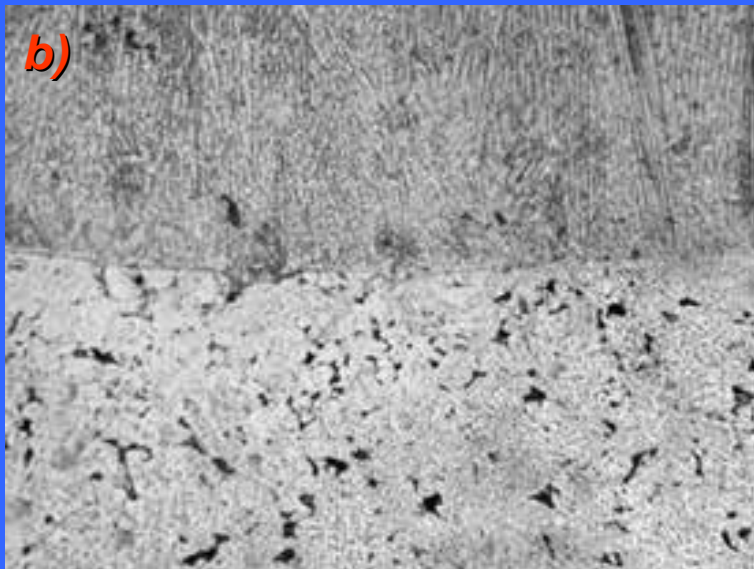
Struktura stali konwencjonalnej: a) strefa centralna przetopienia warstwy wierzchniej po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 1,9 kW;  
b) strefa centralna warstwy wierzchniej stali spiekanej po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 1,1 kW, powiększenie 1000x



## Struktura stali przetopionej laserowo



Struktura powierzchni stali spiekanej: a) brzeg przetopienia warstwy wierzchniej po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 1,4 kW, powiększenie 1000x, b) granica strefy przetopionej warstwy wierzchniej po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 1,9 kW, powiększenie 200x, c) strefa centralna warstwy wierzchniej po przetapianiu przy parametrach: prędkość skanowania – 0,5 m/min, moc wiązki – 1,9 kW, powiększenie 1000x



## ***Struktura stali przetopionej laserowo***

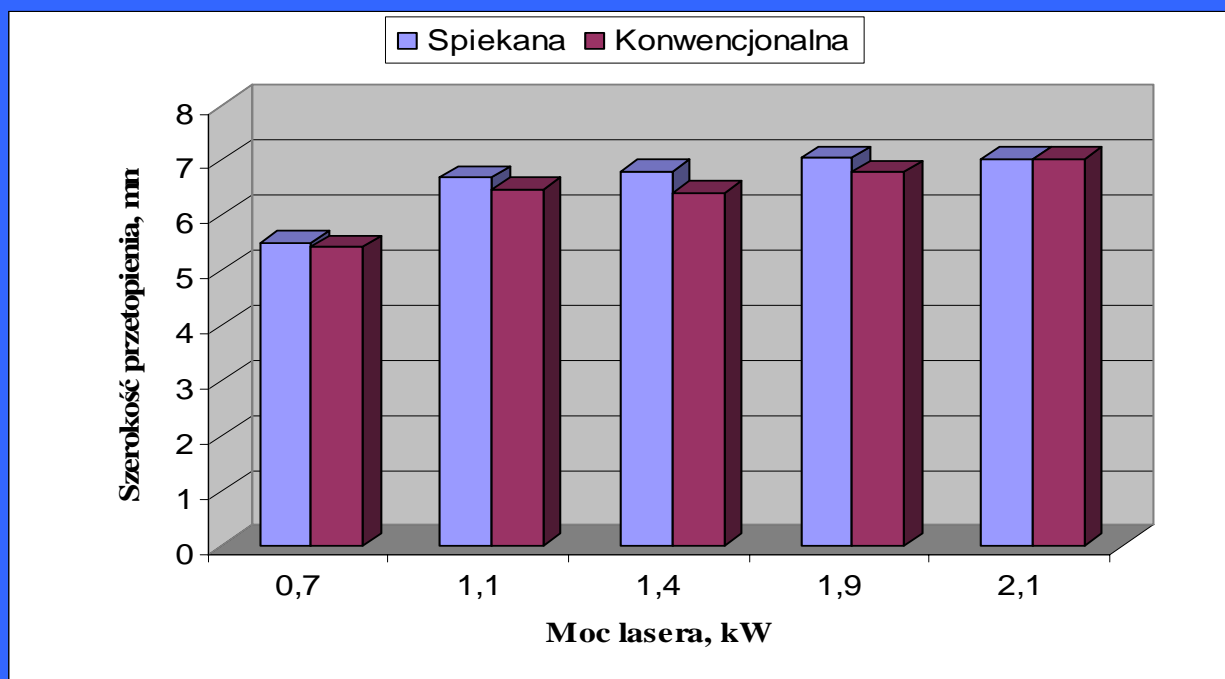
*Struktura stali spiekanej: a), b) brzeg przetopienia warstwy wierzchniej stali po przetapianiu wiązką o mocy – 2,1 kW, pow. 1000x*





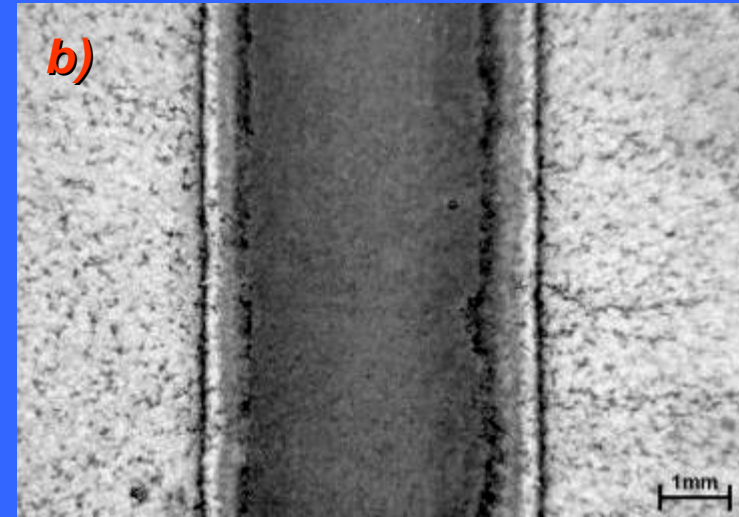
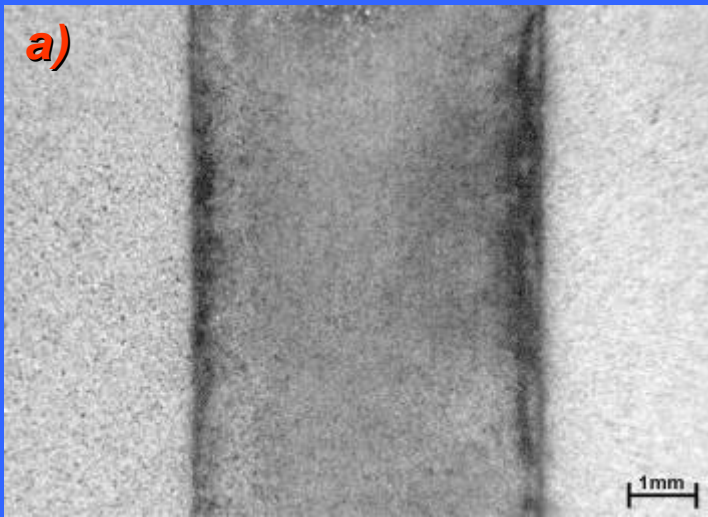
## Szerokości przetopienia w zależności od gęstości mocy lasera

Moc lasera, kW	0,7	1,1	1,4	1,9	2,1
Średnia szerokości przetopienia na stali konwencjonalnej, mm	5,416	6,473	6,41	6,793	7,033
Średnia szerokości przetopienia na stali spiekanej, mm	5,503	6,696	6,803	7,05	7,033

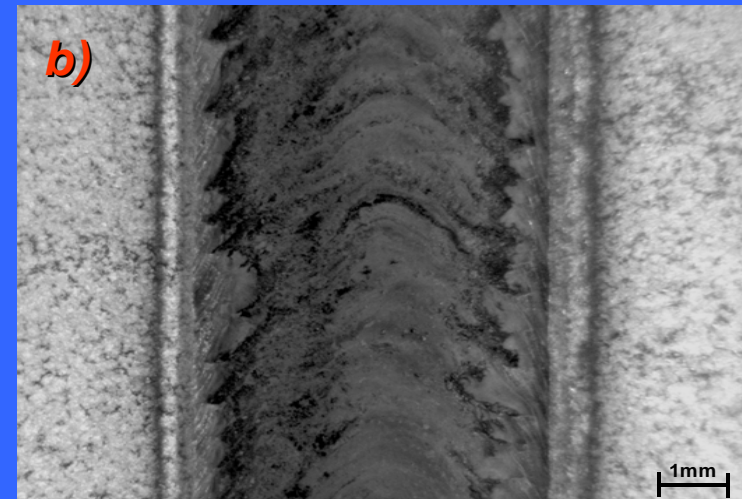
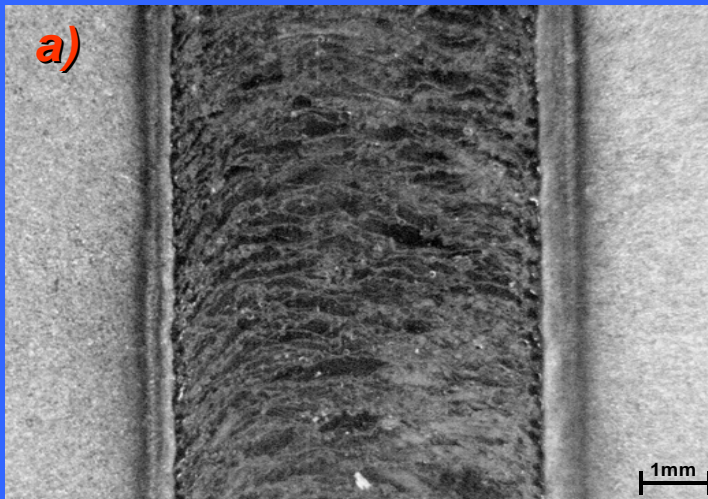


Wpływ mocy laserowego przetapiania na szerokość przetopienia

Szerokości przetopienia w zależności od gęstości mocy lasera



Warstwa wierzchnia stali po przetapianiu przy parametrach: moc wiązki – **0,7 kW** a) stal spiekana X2CrNiMo17-12-2, b) stal konwencjonalna X2CrNiMo18-15-3; pow. 42x



Warstwa wierzchnia stali po przetapianiu przy parametrach: moc wiązki – **2,1 kW** a) stal spiekana X2CrNiMo17-12-2, b) stal konwencjonalna X2CrNiMo18-15-3; pow. 42x





## *Twardości przetopionych warstw*

Stwierdzono, że twardość spiekanej stali austenitycznej rośnie wraz ze zwiększaniem mocy lasera do wartości **1,9 kW** dla której twardość wynosi 65,3 HRA a przy mocy 2,1 kW nieznacznie się zmniejsza.

Badania twardości stali konwencjonalnej austenitycznej nie wykazały znaczącego zwiększenia twardości stali. Przy użytych gęstościach mocy twardość pozostawała na tym samym poziomie co przed przetopieniem, a w niektórych przypadkach uległa zmniejszeniu.

*Wyniki pomiaru twardości przed i po laserowym przetapianiu stali spiekanej*

Moc lasera, kW	0	0,7	1,1	1,4	1,9	2,1
Twardość HRA <sub>śr</sub>	48,1	52,6	59,2	58,6	65,3	62,6

*Wyniki pomiaru twardości przed i po laserowym przetapianiu stali konwencjonalnej*

Moc lasera, kW	0	0,7	1,1	1,4	1,9	2,1
Twardość HRA <sub>śr</sub>	67,0	67,2	65,4	68,0	67,1	67,8



## Chropowatość powierzchni

Badania chropowatości badanych stali wykazały, że największą gładkość powierzchni uzyskuje się przy gęstości mocy lasera **1,1 kW**. W przypadku konwencjonalnej stali austenitycznej parametr **Ra** zmalał siedmiokrotnie z wartości **3,48  $\mu\text{m}$**  do **0,49 $\mu\text{m}$** , co odpowiada dziewiątej klasie chropowatości wg Polskiej Normy. Stal spiekana odznacza się niższą gładkością powierzchni i dla powierzchni stali przetapianej z gęstością mocy 1,1 kW uzyskano parametr **Ra** równy **1,17 $\mu\text{m}$** .

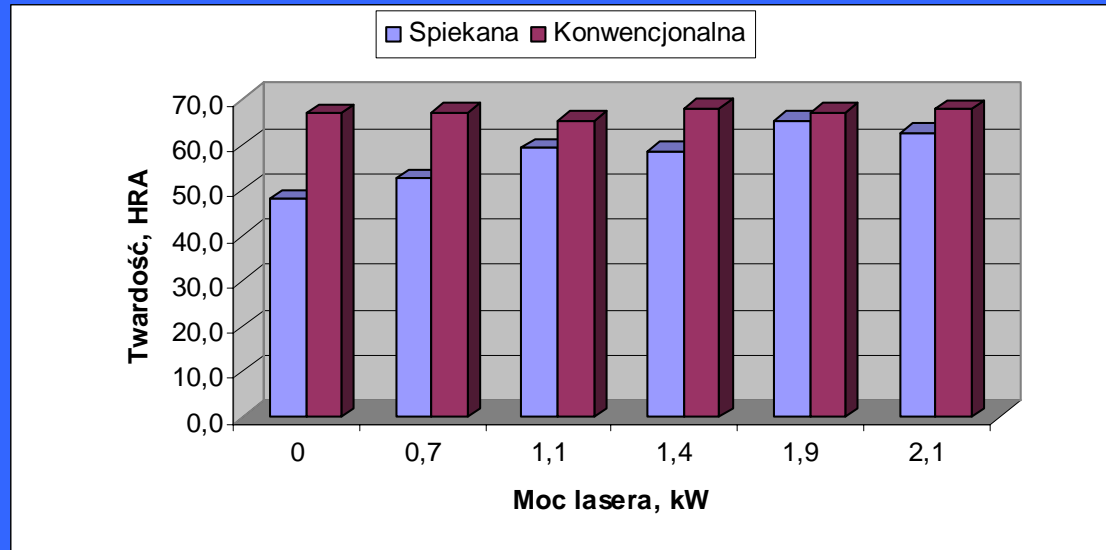
*Wyniki pomiaru chropowatości po laserowym przetapianiu stali spiekanej*

Moc lasera, kW	0	0,7	1,1	1,4	1,9	2,1
Chropowatość, $Ra_{\text{sr}}$ , $\mu\text{m}$	1,55	1,7566	1,1733	1,2933	1,8	2,07

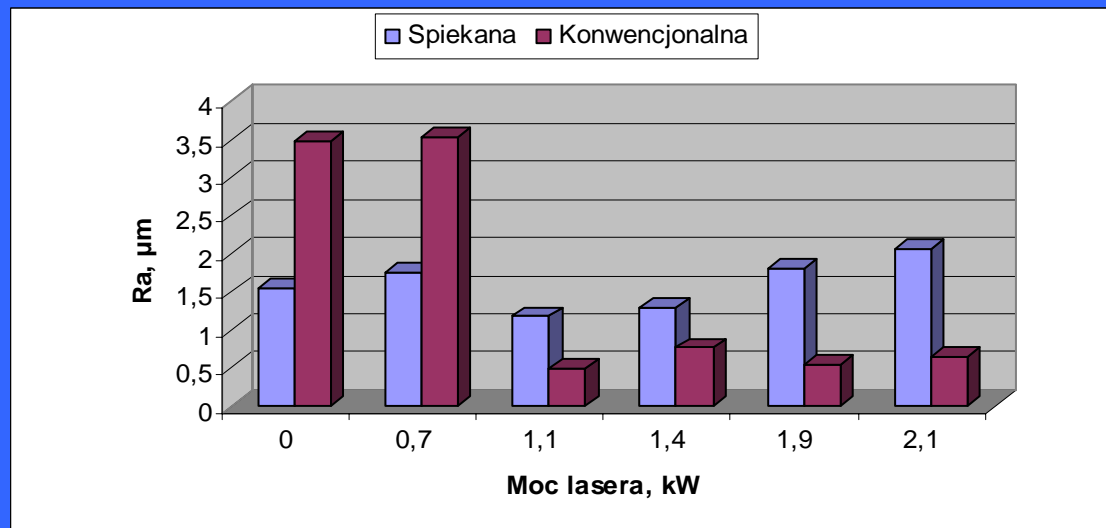
*Wyniki pomiaru chropowatości po laserowym przetapianiu stali konwencjonalnej*

Moc lasera, kW	0	0,7	1,1	1,4	1,9	2,1
Chropowatość, $Ra_{\text{sr}}$ , $\mu\text{m}$	3,4833	3,5366	0,4933	0,7633	0,5366	0,6466

## Wpływ mocy laserowego przetapiania na twardość i chropowatość powierzchni



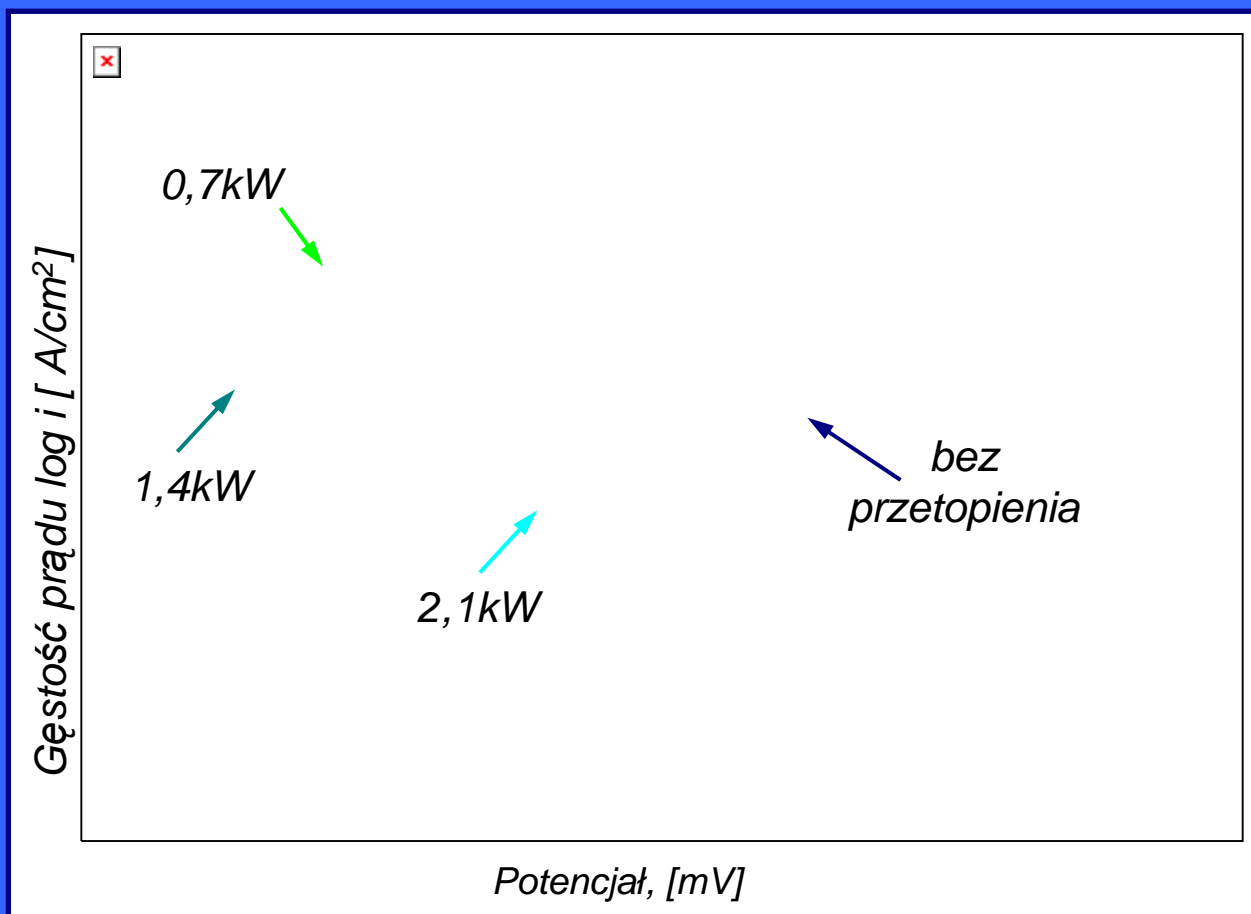
Wpływ mocy laserowego przetapiania na twardość powierzchni



Wpływ mocy laserowego przetapiania na chropowatość powierzchni

## Odporność korozyjna przetapianych laserowo stali austenitycznych

Na podstawie przebiegu krzywych polaryzacji anodowej uzyskanych w badaniach korozyjnych metodą potencjodynamiczną w 1M roztworze NaCl, postępując się metodą ekstrapolacji Tafela, wyznaczono ilościowe dane opisujące zjawisko korozji elektrochemicznej badanych stali.



$E_{kor}$  (mV),

$E_{(i=0)}$  (mV)

$i_{kor}$  ( $mA/cm^2$ )

$R_p$  ( $k\Omega/cm^2$ )

$V_p$  ( $\mu m/rok$ )

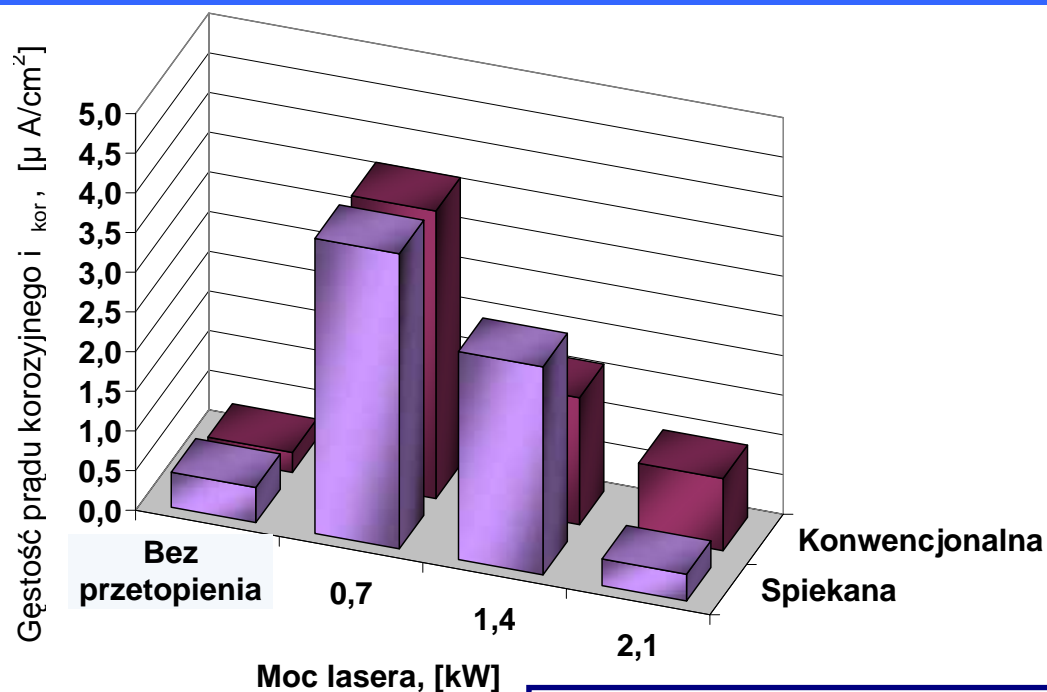
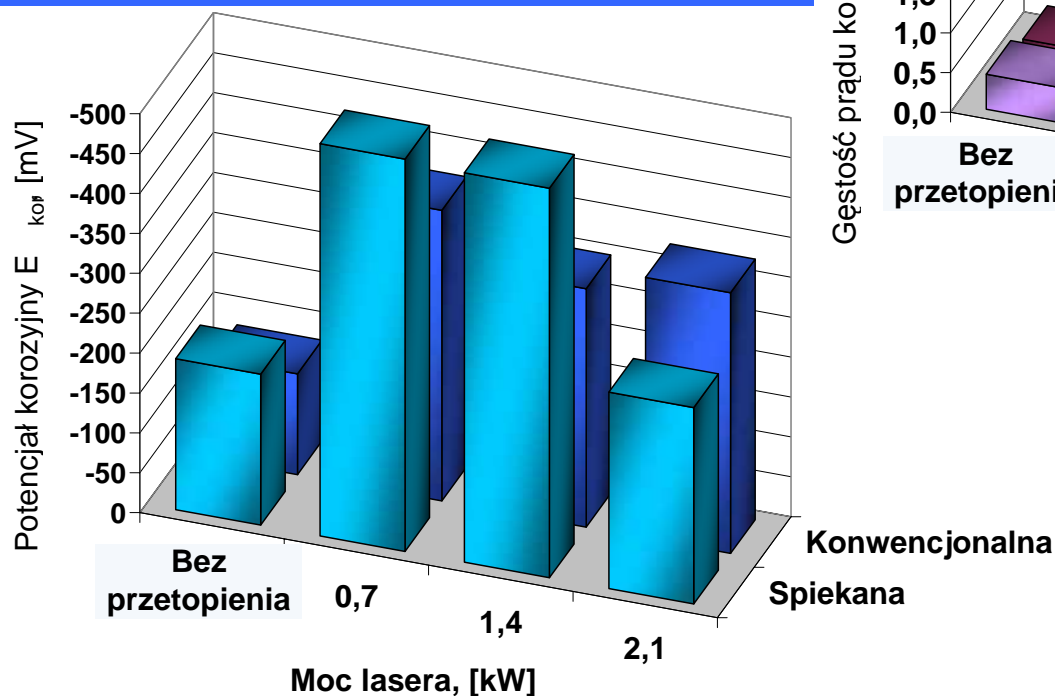
$V_c$  ( $mg/m^2$ )

Krzywe polaryzacji  
anodowej spiekanej stali  
austenitycznej



## Odporność korozyjna przetapianych laserowo stali austenitycznych

Wpływ mocy lasera na gęstość prądu korozyjnego  $i_{kor}$

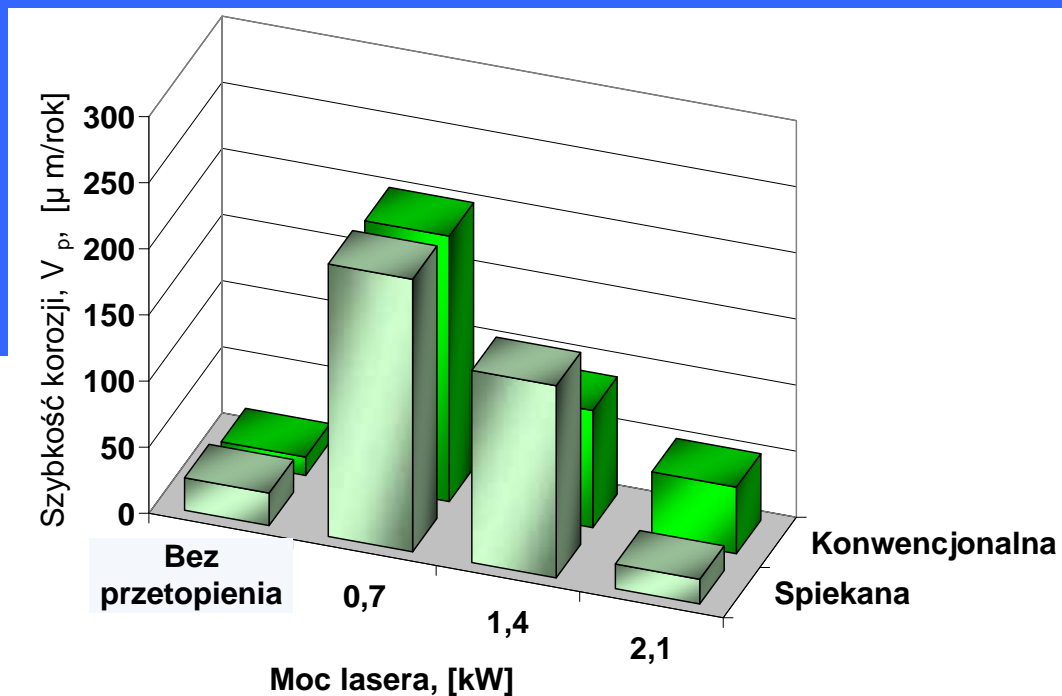
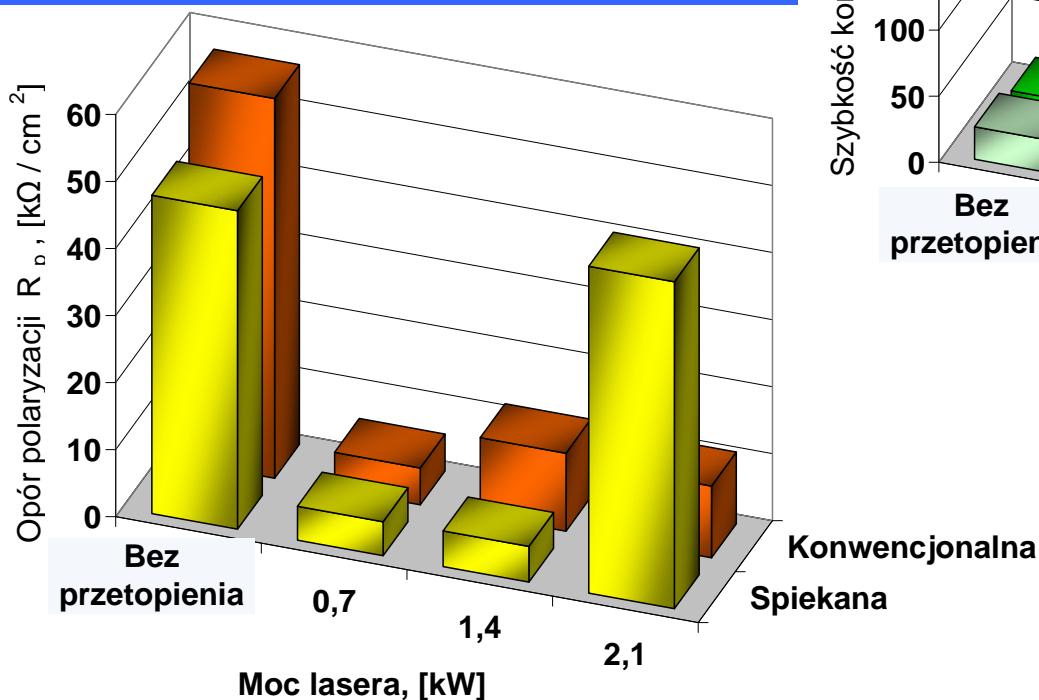


Spiekana stal po przetopieniu 2,1 kW charakteryzowała się najniższą wartością;  $i_{kor} = 0,3365 \mu A/cm^2$

Wpływ mocy lasera na potencjał korozyjny  $E_{kor}$

## Odporność korozyjna przetapianych laserowo stali austenitycznych

Wpływ mocy lasera na szybkość korozji  $V_p$



Wpływ mocy lasera na opór polaryzacji  $R_p$



## ***Odporność korozyjna przetapianych laserowo stali austenitycznych***

Przeprowadzone badania korozyjne wykazały, że najgorszymi parametrami elektrochemicznymi i tym samym najniższą odpornością korozyjną charakteryzują się stale przetapiane przy gęstości mocy lasera wynoszącej **0,7kW**, zarówno konwencjonalne jak i spiekane, a ich parametry są niższe od stanu wyjściowego.

Najlepsze parametry elektrochemiczne wykazują stale przetapiane laserowo przy zastosowaniu mocy lasera **2,1kW**. W obu przypadkach – stali konwencjonalnych i spiekanych, ujawniono znaczne polepszenie parametrów elektrochemicznych i co się z tym wiąże odporności korozyjnej wraz ze wzrostem gęstości mocy lasera w zakresie od 0,7 do 2,1 kW.

Stal spiekana wykazuje wyższą odporność korozyjną po przetapianiu przy gęstości mocy 2,1 kW, a w przypadku stali konwencjonalnej wydaje się, że konieczne jest zastosowanie wyższych mocy lasera do otrzymania porównywalnych rezultatów.

## ***Wnioski***

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że:

1. Przetapianie wpływa na rozdrobnienie struktury w całym badanym zakresie mocy lasera i zróżnicowanie wielkości ziarna w poszczególnych strefach warstwy wierzchniej. Struktura materiału krzepnącego po przetapianiu laserowym charakteryzuje się zróżnicowaną morfologią, związaną z wielokrotną zmianą kierunku wzrostu kryształów, od niewielkich dendrytów, których główne osie zorientowane są zgodnie z kierunkami odprowadzania ciepła na granicy między fazami stałą i ciekłą do drobnych równoosiowych ziarn w strefie przypowierzchniowej.
2. W przypadku stali austenitycznej otrzymanej w procesie metalurgii proszków twardość warstwy wierzchniej wzrasta z gęstością mocy lasera zastosowanej do przetopienia i jest o ok. 25% wyższa od twardości stali w stanie wyjściowym. W przypadku stali austenitycznej wytworzonej metodami konwencjonalnymi twardość utrzymuje się na stałym poziomie lub nieznacznie maleje.





## ***Wnioski***

3. Najlepszą gładkość powierzchni, zarówno dla stali spiekanej jak i litej uzyskano przy gęstości mocy 1,1 kW. Dla spiekanej stali austenitycznej parametr Ra wyniósł 1,17 $\mu$ m, zaś dla stali konwencjonalnej 0,49 $\mu$ m.
4. Odporność korozyjna badanych stali austenitycznych zależy od mocy lasera zastosowanej do przetapiania. Najlepszymi parametrami elektrochemicznymi i tym samym najwyższą odpornością korozyjną po przetapianiu charakteryzują się stale uzyskane przy gęstości mocy wynoszącej 2,1 kW. Przetapiane stale spiekane przy gęstości mocy 2,1kW wykazują odporność korozyjną wyższą w porównaniu do stanu wyjściowego.
5. Uzyskane wyniki badań wskazują na możliwość i celowość praktycznego zastosowania przetapiania przy użyciu lasera diodowego dużej mocy przy wytwarzaniu niektórych elementów ze stali austenitycznych wytworzonych metodami konwencjonalnymi jak i metodami metalurgii proszków.



POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH  
Wydział Mechaniczny Technologiczny

***Dziękuję za uwagę***

*Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych*