

W celu oceny jakości złączy spawanych blach cienkich przeprowadzono próby spawania wiązką lasera. Do badań wykonano jednostronne złącza doczołowe ze spoiną czołową bez materiału dodatkowego. Proces spawania prowadzono na blachach o grubości 3 mm ze stali S690QL.

Ocenę jakości przeprowadzono w oparciu o następujący program badań:

- badania wizualne wg PN-EN ISO 17637 (ocena wg PN-EN ISO 13919-1),
- badania makro- i mikroskopowe wg PN-EN ISO 17639,
- pomiary twardości.

### Materiał do badań

Do badań użyto stali S690QL o składzie chemicznym wg PN-EN ISO 10025-6 podanym w tabeli 1. Jest to stal konstrukcyjna drobnoziarnista o podwyższonych parametrach wytrzymałościowych w stanie ulepszonym cieplnie przeznaczona na konstrukcje i elementy np. dźwigów i żurawi.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
max 0,20	max 1,70	0,20+ 0,80	max 0,020	max 0,010	max 1,50	max 2,0	max 0,70
Al	V	Ti	Cu	N	Zr	B	CEV
max 0,05	max 0,12	max 0,05	max 0,50	max 0,015	max 0,15	max 0,005	max 0,65

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

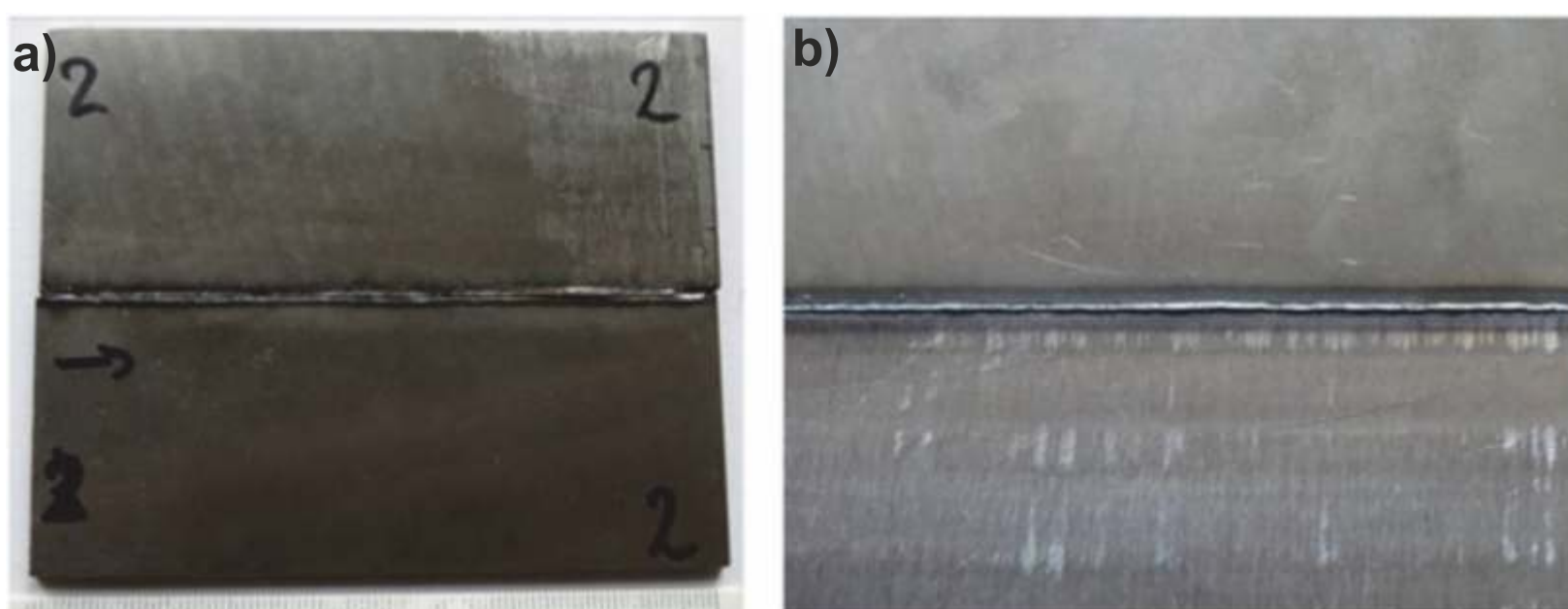
Tabela 1. Skład chemiczny stali S690QL wg PN-EN ISO 10025-6

### Wykonanie próbek do badań

Blachy przed spawaniem obrobiono mechanicznie w celu możliwie dokładnego dopasowania łączonych brzegów i ograniczenia efektu nieprostokątności brzegów względem płaszczyzny blachy i falistości powierzchni. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe złącze spawane. Próby spawania przeprowadzono z parametrami wskazanymi w tabeli 2. W przypadku wszystkich połączeń uzyskano pełne wtopienie.

Numer próbki	Prędkość spawania, m/min (m/s)	Moc wiązki, W	Położenie ogniska wiązki	Średnica ogniska wiązki, mm
1	1,2 (0,020)	2000	Na powierzchni	0,6
2	2,5 (0,041)	3000	Na powierzchni	0,6
3	3,5 (0,058)	4000	Na powierzchni	0,6
4	4,5 (0,075)	5000	Na powierzchni	0,6

Tabela 2. Parametry procesu spawania wiązką lasera stali S690QL

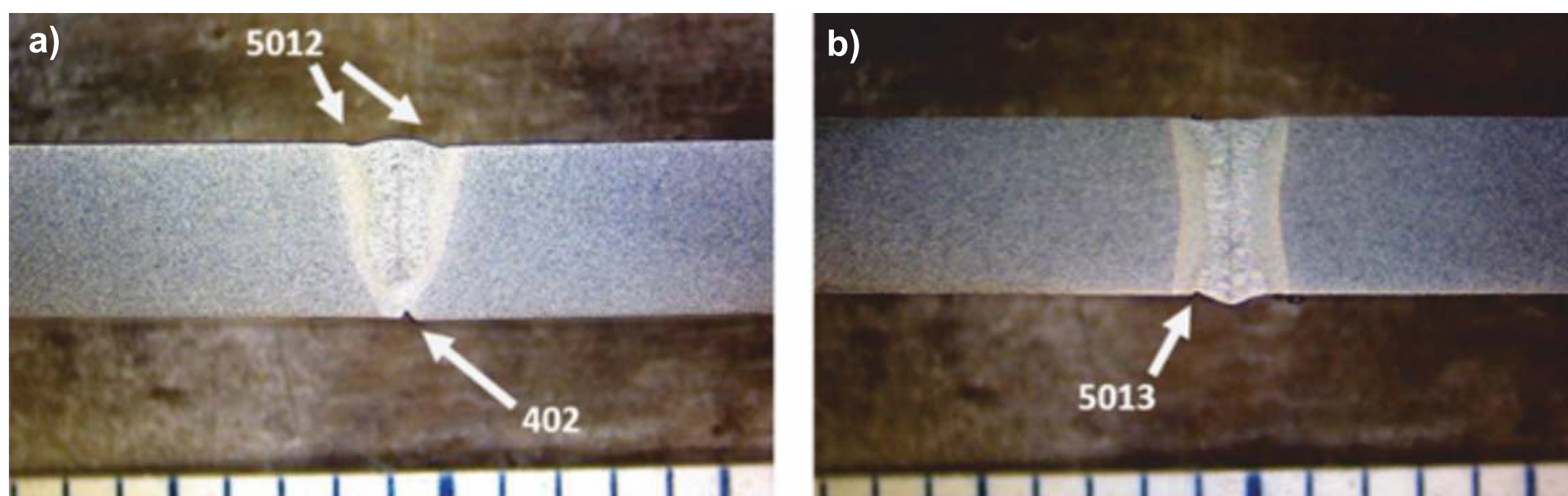


Rys. 1. Złącze spawane wiązką lasera stali S690QL: a) widok ogólny od lica spoiny, b) widok grani

### Badania wizualne i makroskopowe

Wszystkie wykonane złącza spawane spełniają wymagania dla poziomu jakości B. Złącza charakteryzują się równomiernym licem z wyraźną łuskowatością charakterystyczną dla spawania wiązką lasera. Po stronie grani obserwowano pełne wtopienie na całej długości spoiny z wyjątkiem złącza 3, gdzie występował lokalnie brak przetopu. Zarówno grań jak i lico spoiny charakteryzuje się lekką wypukłością (wzrost objętości spoiny). Wskazuje to na występowanie pustek wewnątrz spoiny.

Złącza charakteryzują się wyraźną spoiną i strefą wpływu ciepła (SWC) ułożoną symetrycznie względem spoiny (rys. 2). W osi spoiny obserwuje się efekt transkrystalicznej krystalizacji spoiny. Ujawniono w złączu 3 występowanie podtopień (5012) i brak przetopu (402). Brak współosiowości spoiny względem łączonych brzegów (ok. 0,2 mm). W przypadku złącza 4 uzyskano wtopienie i wypukłą grań spoiny (wyciek - 504), ale lico spoiny jest nieznacznie obniżone względem płaszczyzny blach (wkłęsnięcie - 509). Widoczne jest również podtopienie grani (5013) niebędące kryterium w ocenie poziomu jakości wg PN-EN 13919-1. W złączach 1 i 2 nie stwierdzono występowania niezgodności spawalniczych wpływających na zmianę przekroju spoiny względem grubości łączonych blach.



Rys. 2. Makrostruktura złączy spawanych z zaznaczonymi głównymi niezgodnościami wg PN-EN ISO 6520-1: a) złącze 3, b) złącze 4

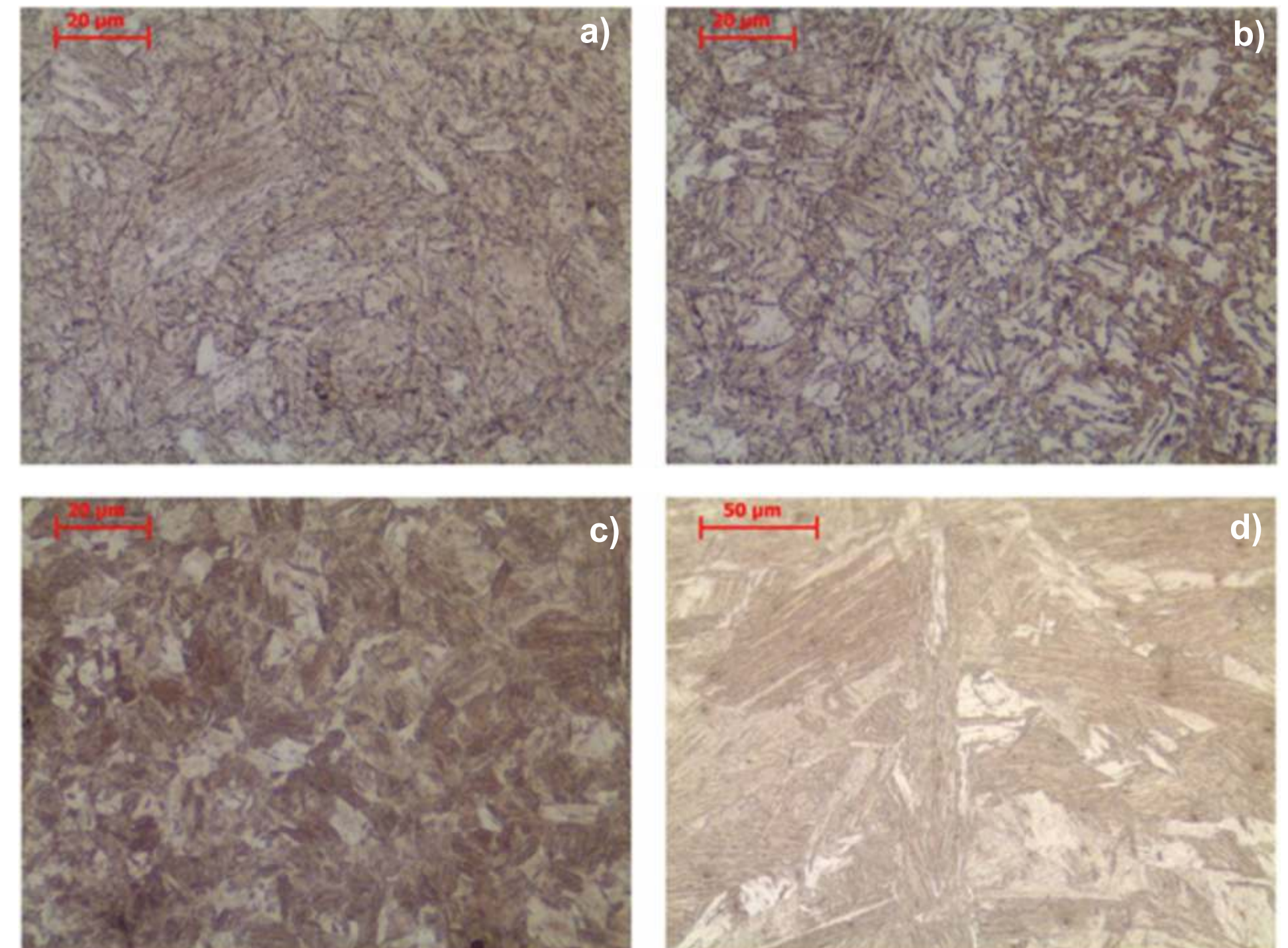
# Ocena mikrostruktury i właściwości mechanicznych złączy stali S690QL spawanych wiązką laserową

Autorzy:

dr inż. Lechosław Tuz, mgr inż. Krzysztof Pańcikiewicz,  
dr inż. Tomasz Góral, dr inż. Sebastian Stano,  
mgr inż. Łukasz Rakoczy

### Badania mikroskopowe

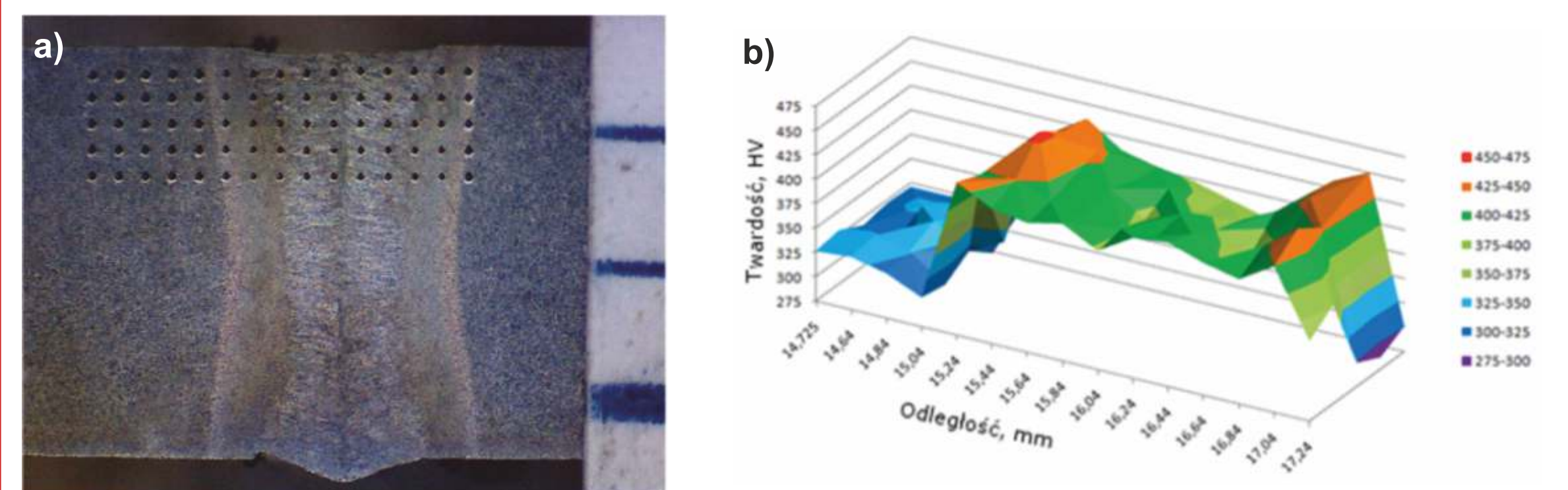
Materiał rodzimy ma drobnoziarnistą odpuszczoną strukturę martenzytowo-bainityczną (rys. 3a). Dodatkowo struktura drobno ziarnista uzyskiwana jest na skutek węglków hamujących rozrost ziarna (m.in. węglków wanadu). W strefie wpływu ciepła zaobserwowano występowanie nowopowstałego, „świeżego” bainitu (rys. 3b) oraz rozrost ziarna austenitu w wysokotemperaturowej SWC przy linii wtopienia (rys. 3c). Spoina charakteryzuje się budową grubokrystaliczną. Wzrost krystalitów następował w kierunku osi spoiny, gdzie obserwowano styk frontów krystalizacji. W tym obszarze obserwowana jest struktura martenzytu z wyraźnymi listwami (rys. 3d).



Rys. 3. Mikrostruktura złącza spawanego stali S690QL wykonanego wiązką lasera, złącze 1: a) materiał rodzimy – odpuszczona struktura martenzytowo-bainityczna, b) obszar niepełnego przekształcenia w SWC – wysokoodpuszczona „stara” struktura martenzytowo-bainityczna ze „świeżymi” produktami przemiany przechłodzonego austenitu, c) martenzytowo-bainityczna struktura gruboziarnista w obszarze przegrzania (przy linii wtopienia); d) spoina – struktura martenzytu listwowego

### Pomiary twardości

Pomiary twardości złącza spawanego wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu wgłębnika 1,0 kg. Pomiary twardości wykonano na złączu 4 w płaszczyźnie prostopadłej do osi spoiny. Na rysunku 4 przedstawiono fotografie złącza z widocznymi odciskami oraz rozkład twardości w złączu. Rozkład twardości wskazuje na lepszą wytrzymałość na rozciąganie spoiny i SWC niż materiału rodzimego. Najwyższe wartości twardości uzyskano w SWC. Nie przekraczają one 450HV w stanie nieobrobionym cieplnie, będącym kryterium akceptacji dla stali ulepszanych cieplnie spawanych łukowo (PN-EN ISO 15614-1).



Rys. 4. Rozkład twardości w złączu 4 stali S690QL spawanym wiązką lasera: a) miejsca pomiaru twardości, b) rozkład twardości w złączu

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych prób spawania i badań sformułowano następujące wnioski:

1. Spawanie wiązką lasera pozwala na uzyskanie wysokiej jakości złączy spawanych stali obrobionej cieplnie o wysokiej wytrzymałości (S690QL).
2. W złączach spawanych wykonywanych w wysokich prędkościach spawania obserwowane są niezgodności spawalnicze mający wpływ na zmniejszenie przekroju czynnego spoiny i występowanie karbu geometrycznego (podtopienia po stronie lica i grani).
3. W strefie wpływu ciepła (SWC) występuje obszar nowopowstałego bainitu, w którym ze względu na wysoką twardość może nastąpić znaczne obniżenie udarności.

### Podziękowania

Badania wykonano w ramach pracy 5.72.110.420. Praca wsparta infrastrukturą badawczą Akademickiego Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH.



#### Kontakt:

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
(12) 617-26-21  
www.agh.edu.pl, ltuz@agh.edu.pl