

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa

Instytut Techniki Uzbrojenia



mgr inż. Paweł PROCHENKA

Badanie stalowych połączeń spawanych laserowo w warunkach obciążenia dynamicznego

Rozprawa doktorska

Promotor: **plk rez. dr hab. inż. Jacek JANISZEWSKI**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Judyta SIENKIEWICZ**

Warszawa 2022

Podziękowanie

Osiągnięcie celu w postaci prezentowanej rozprawy nie byłoby możliwe, gdyby nie osoby, które mnie motywowały, wspierały oraz wierzyły w mój plan.

Przede wszystkim dziękuję Panu dr hab. inż. Jackowi Janiszewskiemu, mojemu promotorowi i mentorowi, za opiekę merytoryczną, wyrozumiałość oraz zaangażowanie.

Dziękuję dr. inż. Judycie Sienkiewicz, Pani promotor pomocniczej, za cenne uwagi i poświęcony czas. Dziękuję również Pani dr inż. Katarzynie Makowskiej za trud przygotowania zglądów i zdjęć struktur materiałowych.

Jestem wdzięczny wszystkim pracownikom Zakładu Technologii i Eksploatacji Uzbrojenia za życzliwość, dyskusję oraz wsparcie merytoryczne pracy.

Dziękuję mgr inż. Kamilowi Kutkowskiemu, za motywowanie, mające realny wpływ na powstanie pracy.

Szczególne podziękowania kieruję do moich najbliższych - Żony, Siostry oraz Rodziców, za nieocenione wsparcie podczas realizacji rozprawy doktorskiej.

SPIS TREŚCI

<i>Wykaz istotniejszych oznaczeń stosowanych w pracy</i>	<i>7</i>
<i>Wprowadzenie.....</i>	<i>9</i>
<i>Rozdział 1. Analiza literaturowa.....</i>	<i>13</i>
1.1. Stale o podwyższonych parametrach wytrzymałościowych.....	13
1.1.1. Stale AHSS pierwszej generacji	19
1.1.2. Stale AHSS drugiej generacji	23
1.1.3. Stale AHSS trzeciej generacji.....	24
1.1.4. Potencjał wykorzystania stali AHSS w procesie wytwarzania struktur energochłonnych.....	25
1.1.5. Czynniki technologiczne ograniczające stosowalność stali o zwiększonej wytrzymałości	29
1.2. Wykorzystanie wiązki laserowej do łączenia stalowych blach.....	31
1.2.1. Czynniki ograniczające zakres stosowalności technologii spawania laserowego do łączenia stalowych blach	32
1.2.2. Metody spawania wiązką laserową.....	33
1.2.3. Urządzenia do spawania wiązką laserową.....	36
1.2.4. Wykorzystanie technologii spawania wiązką laserową w przemysłowym łączeniu blach	38
1.2.5. Metody oceny jakości połączeń spawanych laserowo.....	41
1.3. Metody badań materiałów w zakresie dużych szybkości odkształcenia	44
1.3.1. Metody badań dynamicznych	44
1.3.2. Metoda dzielonego pręta Hopkinsona	46
1.3.3. Problematyka prowadzenia badań dynamicznych z użyciem próbek płaskich	50
1.4. Energochłonność mechaniczna cienkościennych absorberów kolumnowych	51
1.4.1. Struktury energochłonne.....	54
1.4.2. Zastosowanie struktur energochłonnych	57
1.4.3. Metody badań wytrzymałościowych struktur energochłonnych	58
1.4.4. Ocena energochłonności absorberów kolumnowych wykonanych ze stali o wysokiej wytrzymałości	59
1.5. Podsumowanie i wnioski wynikające z przeglądu literaturowego.....	60
<i>Rozdział 2. Cel i zakres pracy.....</i>	<i>63</i>
2.1. Cel i teza pracy	63

2.2. Zakres rozprawy	64
<i>Rozdział 3. Materiały i metody badawcze</i>	67
3.1. Charakterystyka badanych materiałów	67
3.2. Przygotowanie próbek do badań wytrzymałościowych na rozciąganie	68
3.2.1. Geometria próbki materiałowej	68
3.2.2. Przygotowanie próbek materiałowych do testów na rozciąganie	69
3.3. Przygotowanie miniaturowych absorberów energii mechanicznej	72
3.3.1. Geometria absorberów energii mechanicznej	72
3.3.2. Etapy procesu wytwarzania miniaturowych absorberów energii mechanicznej	73
3.4. Charakterystyka procesu spawania wiązką laserową	77
3.4.1. Charakterystyka procesu technologicznego spawania próbek materiałowych	77
3.4.2. Charakterystyka procesu technologicznego spawania miniaturowych absorberów energii mechanicznej	83
3.5. Metodyka wyznaczenia wydłużenia równomiernego	84
3.6. Metodyka badań metalograficznych złącz spawanych	85
3.7. Metodyka pomiaru mikrotwardości	86
3.8. Metodyka badań nieniszczących złącz spawanych	86
3.9. Metodyka badań wytrzymałościowych w zakresie quasi-statycznego odkształcenia ..	88
3.10. Charakterystyka prowadzenia badań z użyciem dzielonego pręta Hopkinsona	89
3.11. Metodyka badań miniaturowych absorberów energii mechanicznej	94
3.11.1. Badania absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia quasi-statycznego	94
3.11.2. Badania absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia dynamicznego	95
<i>Rozdział 4. Wyniki badań własnych połączeń spawanych</i>	97
4.1. Badania stali Strenx S700MC	97
4.1.1. Wizualna ocena jakości złącza spawanego	97
4.1.2. Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego	98
4.1.3. Rozkład mikrotwardości wykonanych złącz spawanych	100
4.1.4. Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Strenx S700MC	101
4.2. Badania stali Docol 800DP	104
4.2.1. Wizualna ocena jakości złącza spawanego	104

4.2.2.	Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego	105
4.2.3.	Rozkład mikrotwardości wykonanych złącz spawanych.....	108
4.2.4.	Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 800DP	110
4.3.	Badania stali Docol 1000DP	113
4.3.1.	Wizualna ocena jakości złącza spawanego.....	113
4.3.2.	Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego	114
4.3.3.	Rozkład mikrotwardości wykonanych złącz spawanych.....	115
4.3.4.	Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 1000DP	116
4.4.	Badania Stali Docol 1200M	120
4.4.1.	Wizualna ocena jakości złącza spawanego.....	120
4.4.2.	Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego	121
4.4.3.	Rozkład mikrotwardości wykonanych złącz spawanych.....	124
4.4.4.	Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 1200M.....	125
4.5.	Badania stali Docol 1500M	129
4.5.1.	Wizualna ocena jakości złącza spawanego.....	129
4.5.2.	Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego	130
4.5.3.	Rozkład mikrotwardości wykonanych złącz spawanych.....	133
4.5.4.	Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 1500M.....	135
Rozdział 5.	<i>Analiza wyników badań połączeń spawanych.....</i>	141
5.1.	Wpływ parametrów technologicznych spawania laserowego na wytrzymałość i ciągliwość złącz spawanych	141
5.2.	Wpływ szybkości odkształcenia na wytrzymałość i ciągliwość złącz spawanych.....	145
5.3.	Energochłonność mechaniczna niespawanych i spawanych próbek materiałowych.	158
5.4.	Podsumowanie analizy wyników.....	162
Rozdział 6.	<i>Badania miniaturowych absorberów energii mechanicznej.....</i>	165
6.1.	Ocena mikrotwardości złącz spawanych w miniaturowych absorberach energii mechanicznych.....	165
6.2.	Testy zgniatania absorberów w warunkach obciążenia quasi-statycznego	166
6.3.	Testy zgniatania absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia dynamicznego	171
6.4.	Podsumowanie	178

<i>Wnioski końcowe</i>	181
<i>Spis ilustracji</i>	187
<i>Bibliografia</i>	198
<i>Załącznik</i>	209

WYKAZ ISTOTNIEJSZYCH OZNACZEŃ STOSOWANYCH W PRACY

Symbol	Oznaczenie	Jednostka
A_o	Powierzchnia przekroju poprzecznego prętów	mm ²
A_{op}	Powierzchnia przekroju poprzecznego próbki	mm ²
a	Grubość materiału	mm
C_o	Prędkość fali propagującej w pręcie	m/s
$CE_{Seferian}$	Ogólny równoważnik węglowy	-
$CE_{SeferianC}$	Zmodyfikowany równoważnik węglowy	-
CFE	Współczynnik efektywności siły zgniatającej	-
d	Skrócenie absorbera	mm
d_{max}	Skrócenie końcowe absorbera	mm
E	Moduł Younga materiału, z którego wykonano pręty	GPa
E_p	Energia absorpcji	J
E_w	Energia właściwa	J/g
E_{wd}	Względna energia deformacji	J/mm ³
ε	Sygnał falowy	-
$\varepsilon_I, \varepsilon_R, \varepsilon_T$	Przebiegi fali wymuszającej, odbitej i transmitującej	-
ε_r	Wydłużenie równomierne	-
ε_c	Wydłużenie całkowite	-
$\dot{\varepsilon}$	Szybkość odkształcenia	s ⁻¹
F	Siła ściskania absorbera	N
F_{max}	Siła zniszczenia absorbera	N
F_s	Średnia siła ściskania absorbera	N
L_u	Długość pomiarowa próbki po zerwaniu	mm
L_0	Długość pomiarowa próbki przed zerwaniem	mm
σ	Naprężenie	Pa
m	Ogólne oznaczenie wrażliwości na szybkość odkształcenia	-
$m_{0,02}$	Wrażliwość na szybkość odkształcenia – użyte wartości naprężenia rzeczywistego odpowiadają odkształceniu 0,02	-
m_a	Masa absorbera	g
n	Współczynnik umocnienia materiału	-
R_m	Wytrzymałość na rozciąganie	Pa

S_0	Pole początkowe przekroju poprzecznego próbki	mm ²
S_r	Średnia wartość pól przekrojów mierzonych w połowie długości pomiędzy szyjką a końcem długości pomiarowej	mm ²
T_p	Temperatura wstępnego podgrzewania materiału	°C

WPROWADZENIE

W grudniu 2020 r. Rada Europejska zatwierdziła cele związane z ograniczeniem emisji szkodliwych substancji do atmosfery o co najmniej 55% do 2030 r. w stosunku do 1990 r., a do 2050 r. państwa członkowskie Unii Europejskiej powinny być neutralne klimatycznie. Są to postanowienia porozumienia paryskiego z 2014 r. mówiące o ograniczeniu wzrostu średniej globalnej temperatury na poziomie poniżej 1,5 °C/rok. Udział gazów cieplarnianych emitowanych przez środki transportu to około jedna trzecia całkowitej masy emitowanych substancji, z czego około 60% to emisja będąca efektem użytkowania samochodów ciężarowych oraz osobowych [1].

Jedną z podejmowanych metod redukcji emisji CO₂ mającą na celu ograniczenie efektów globalnego ocieplenia jest zmiana podejścia producentów do projektowania środków transportu. Obecnie ta transformacja wyraża się w licznych próbach zastosowania napędów wodorowych i elektrycznych w pojazdach drogowych, jak i szynowych. Przykładem jest polityka firmy Tesla, której flagowy model jest obecnie jednym z najlepiej sprzedających się samochodów elektrycznych klasy wyższej na świecie. Inną metodą jest zmniejszanie masy pojazdów w celu ograniczenia spalania, a w efekcie redukcja emisji szkodliwych substancji. W przypadku pojazdów elektrycznych zmniejszanie masy wiąże się bezpośrednio ze zwiększeniem ich zasięgu do następnego ładowania i jest to istotne ze względu na wysoką masę pakietów bateryjnych. Analizując trendy światowej produkcji samochodów osobowych najczęściej wykorzystywanymi materiałami stosowanymi do produkcji tego typu pojazdów są: stal AHSS (*ang. Advanced High Strength Steel*), stopy aluminium, stopy magnezu, kompozyty z włóknami węglowymi i szklanymi. W przypadku pojazdów klasy średniej najbardziej korzystny stosunek masy do kosztów pojazdu osiąga się poprzez użycie do produkcji głównie stali konwencjonalnej oraz stali AHSS, ze względu na niższą cenę stosowanych stopów stali w porównaniu do aluminium.

Oprócz zalet związanych z wykorzystaniem stali o wysokich parametrach wytrzymałościowych, stosowanie ww. stali w produkcji konstrukcji blaszanych (np. karoserie samochodowe) ma swoje wady i ograniczenia, a jedną z największych są problemy związane z ich łączeniem. Obecnie najczęściej stosowaną technologią łączenia jest rezystancyjne zgrzewanie punktowe, jednak technologia spawania laserowego jest coraz częściej stosowana,

m.in. ze względu na mniejszy zakres strefy oddziaływania cieplnego w stosunku do klasycznych metod łączenia. Jest to szczególnie istotne w przypadku łączenia materiałów wrażliwych na wprowadzone ciepło podczas procesu ich spawania. Dodatkowo, technologia spawania laserowego jest najtańszą technologią łączenia blach w przypadku produkcji wielkoseryjnej.

Wspomniane działania mające na celu zmniejszanie masy pojazdów muszą być realizowane w sposób zapewniający wymagany poziom bezpieczeństwa. Według Narodowej Organizacji Zdrowia co 80 sekund na świecie ginie osoba uczestnicząca w wypadku samochodowym [2]. W związku z tym stale doskonalą się wszelkiego rodzaju rozwiązania zmierzające do przeciwdziałania i ograniczenia skutków kolizji i wypadków drogowych. W odróżnieniu do aktywnych systemów bezpieczeństwa mających na celu ochronę przed kolizją, systemy bierne minimalizują skutki tychże zdarzeń. Przykładem stosowanych rozwiązań ochrony biernej w środkach transportu są m.in. strefy kontrolowanego zgniotu składające się ze struktur energochłonnych, które ulegają kontrolowanemu odkształceniu dynamicznemu podczas zderzenia. W celu zapewnienia wysokiego wskaźnika bezpieczeństwa pasywnego konieczne jest zrozumienie procesów zachodzących podczas deformacji struktur energochłonnych w warunkach wysokich szybkości odkształcenia występujących podczas zderzeń. Wiedza oraz doświadczenie eksperckie z tego zakresu są w szczególności istotne, gdy podejmuje się stałe wysiłki ukierunkowane na wprowadzanie do produkcji seryjnej coraz bardziej zaawansowanych gatunków stali karoseryjnych.

Pomimo faktu, iż problematyka badań reakcji mechanicznej stali AHSS w warunkach obciążenia dynamicznego jest obszernie opisana w literaturze, to jedynie nieliczne publikacje poświęcone są tematyce badania wytrzymałości złączy wykonanych z tej grupy stali spawanych laserowo w warunkach obciążeń dynamicznych. Przyczyną ograniczonej liczby publikacji z tej tematyki mogą być trudności związane z badaniem materiałów w warunkach szybkości odkształcenia powyżej 10^3 s^{-1} oraz ograniczony dostęp do aparatury badawczej służącej do przygotowania złączy spawanych laserowo. Dodatkowo, w trakcie pracy zawodowej, współpracując z czołowymi producentami pojazdów drogowych i szynowych zaobserwowałem ograniczoną świadomość inżynierów konstruktorów technologów związaną z problematyką oceny jakości połączeń spawanych laserowo użytych w strukturach poddanych obciążeniom dynamicznym.

Tematyka niniejszej rozprawy doktorskiej, jak i jej zakres jest rezultatem nie tylko aktywności badawczej autora pracy jako doktoranta Wojskowej Akademii Technicznej Wydziału Mechatroniki Uzbrojenia i Lotnictwa, ale także osoby odpowiedzialnej za prace badawczo - rozwojowe w organizacji zajmującej się projektowaniem i produkcją wyrobów dla branży motoryzacyjnej i kolejowej, w tym także struktur energochłonnych. Treści zawarte w niniejszym opracowaniu wynikają zatem zarówno z doświadczeń zawodowych autora w zakresie technologii łączenia stali AHSS, jak i wiedzy i umiejętności zdobytych podczas studiów doktoranckich, obejmujących m.in. problematykę badań dynamicznych właściwości mechanicznych materiałów w warunkach testu dzielonego pręta Hopkinsona.

- strona celowo pozostawiona pusta -

ROZDZIAŁ 1

ANALIZA LITERATUROWA

1.1. STALE O PODWYŻSZONYCH PARAMETRACH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Stal jest jednym z najpowszechniej stosowanych materiałów inżynierskich na świecie. Ze względu na swoje właściwości mechaniczne takie, jak wytrzymałość, plastyczność, udurowienie oraz niższy koszt wytworzenia w porównaniu do innych materiałów metalicznych jest wykorzystywana w budowie pojazdów od początku istnienia przemysłu motoryzacyjnego. Przed 1970 r. pojazdy były produkowane ze stali konwencjonalnej o wysokiej plastyczności, umożliwiających wykonywanie stalowych części z dużą powtarzalnością oraz prostotą naprawy uszkodzonych podzespołów nadwozia pojazdu po kolizji lub wypadku [3]. W późnych latach siedemdziesiątych na rynku pojawiła się stal niskostopowa o zwiększonej wytrzymałości HSLA (*ang. High Strength Low Alloy*) posiadająca wyższą wytrzymałość niż wcześniej wykorzystywane gatunki stali. Przełomem na rynku stali było powstanie na początku lat dziewięćdziesiątych pierwszej generacji stali AHSS. Materiały zawarte w tej grupie stali charakteryzują się wysoką wytrzymałością przy koszcie porównywalnym lub nieznacznie wyższym od stali HSLA. Ponadto, wraz z wprowadzaniem regulacji prawnych związanych z bezpieczeństwem pojazdów, elementy wykonane z nowo opracowanymi stalami AHSS cechowały się wyższymi parametrami energochłonności. Stąd, ta grupa stali jest obecnie jedną z najszybciej rozwijających się grup materiałów konstrukcyjnych stosowanych powszechnie w przemyśle motoryzacyjnym [4].

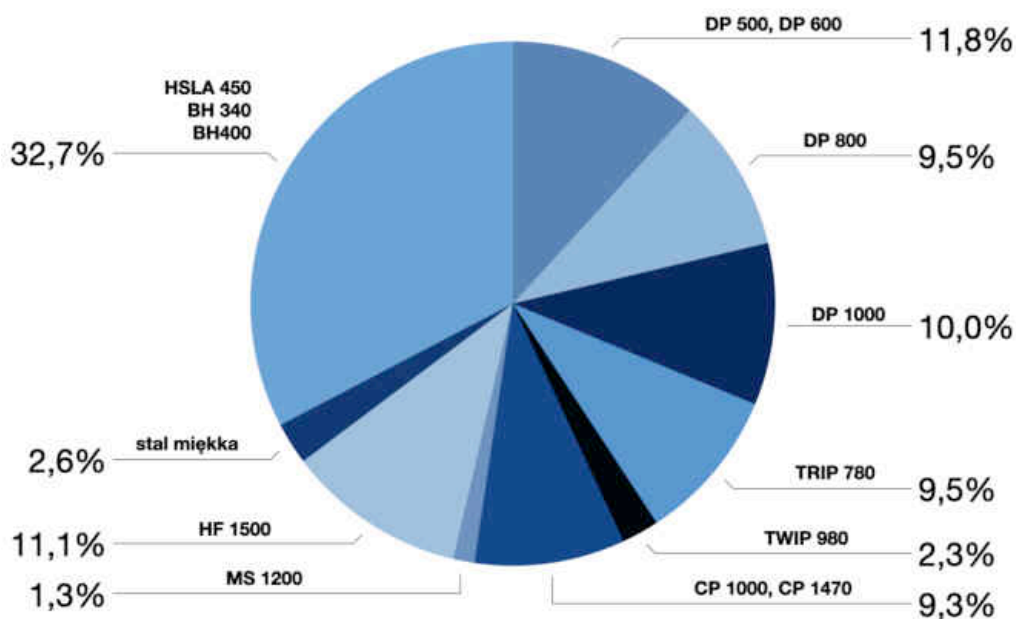
W historii rozwoju stali o podwyższonej wytrzymałości istotnym etapem był rok 1994, w którym zaprezentowano strukturę pojazdu Audi A8 wykonaną ze stopów aluminium, której masa była znacznie niższa w stosunku do konstrukcji wykonanej ze stali [5]. Odpowiedzią branży stalowej na silny rozwój stopów aluminium na początku lat dziewięćdziesiątych było zainicjowanie projektu ULSAB (*ang. UltraLight Steel Auto Body*), mającego na celu zmniejszenie masy produkowanych pojazdów przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa oraz przystępności cenowej. Projekt realizowany był przez konsorcjum 35 firm z branży stalowej i zakończył się w 1997 roku. Wynikiem projektu była koncepcja oraz prototyp struktury pojazdu, którego masa była niższa o 36% w stosunku do

dostępnych w tamtych latach pojazdów tej samej klasy przy zachowaniu podobnego poziomu kosztów jego produkcji. Projekt kontynuowano w późniejszych latach pod akronimem ULSAB – AVC (*ang. Advaced Vehicle Concept*), a jego celem było wykorzystanie stali o najwyższych parametrach wytrzymałościowych oraz wdrożenie zaawansowanych technologii produkcyjnych takich, jak: spawanie laserowe, formowanie ciśnieniowe (hydroforming) czy też TWB (*ang. Tailored Welded Blanks*) – czyli doczołowe spawanie laserowe formatek blach o różnych grubościach lub/i różnych parametrach wytrzymałościowych. Projekt zakończono w 2001 r., a jego rezultatem było zmniejszenie udziału stali konwencjonalnej w strukturze pojazdu do poziomu 15% [6]. Pomimo tego, że w latach dziewięćdziesiątych samochód Audi A8 był w większej części wykonany ze stopów aluminium to obecnie samochody tego typu klasy budowane są przede wszystkim ze stali (40% - udziału masowego), stosując głównie stale typu AHSS [3].

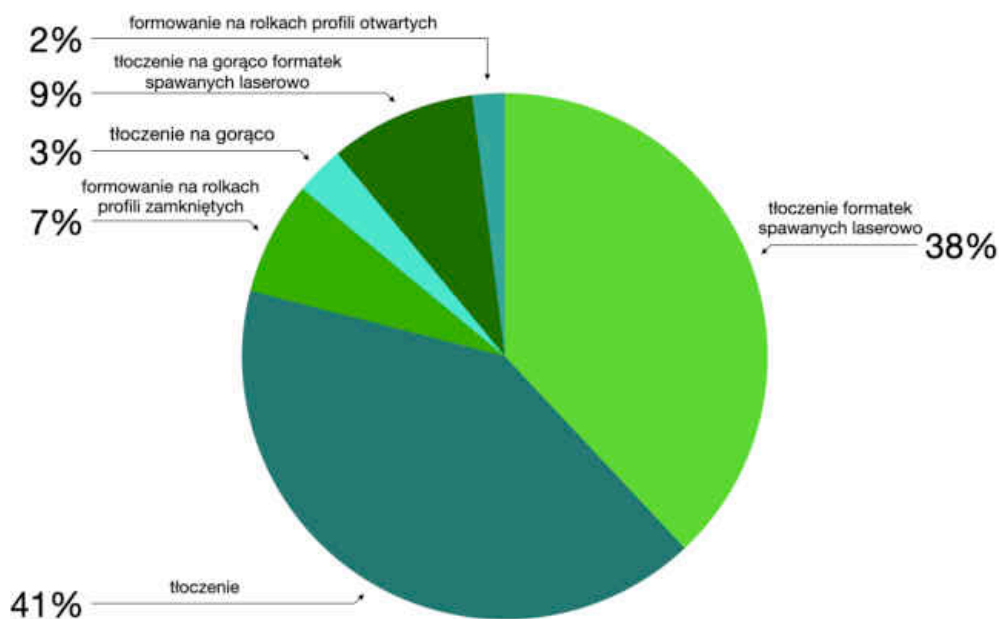
Kolejnym istotnym programem rozwojowym nowych gatunków z grupy stali AHSS był projekt FSV (*ang. Future Steel Vehicle*). Projekt trwał trzy lata, zakończono go w 2011 roku. Dotyczył on zastosowania stali o wysokiej wytrzymałości oraz nowoczesnych technologii wytwórczych do produkcji trzech głównych typów pojazdów [7]:

- elektrycznych BEV (*ang. Battery Electric Vehicle*);
- hybrydowych PHEV (*ang. Plug-in Hybrid Electric Vehicle*);
- elektrycznych, wodorowych (*ang. fuel cell hybrid electric vehicle*).

W powyższym projekcie zaprezentowano strukturę nośną pojazdu składającą się w 97% ze stali HSS (*ang. High Strength Steel*) i AHSS. Na rys. 1 przedstawiono procentowy udział wymienionych gatunków stali użytych do wykonania struktury nośnej pojazdu zbudowanego w ramach projektu FSV. Ponadto, dzięki zastosowaniu cienkich stalowych blach oraz technologii produkcji takich, jak: spawanie laserowe, formowanie ciśnieniowe, profilowanie za pomocą rolek, tłoczenie formatek spawanych laserowo, zmniejszono o 39% masę pojazdu w stosunku do masy pojazdu referencyjnego [8,9]. Z kolei na rys. 2 przedstawiono procentowy udział masowy podzespołów konstrukcji nadwozia pojazdu zbudowanego w ramach projektu FSV produkowanych z wykorzystaniem wcześniej wymienionych technologii.



Rys. 1. Gatunki materiałów wykorzystywanych w projekcie FSV [9]



Rys. 2. Główne technologie produkcyjne wykorzystywane w projekcie FSV [9]

Zasadniczo wyróżnia się trzy grupy stali wykorzystywanych w branży motoryzacyjnej: stal konwencjonalną, stal HSS oraz stal AHSS, która doczekała się trzech kolejnych generacji rozwojowych. Jednym ze sposobów klasyfikacji stali do budowy nadwozi pojazdów jest

podział według kryterium wytrzymałości i ciągliwości. Parametry te dla wymienionych gatunków stali przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Podział stali stosowanych w branży samochodowej ze względu na wytrzymałość i ciągliwość [3,4,10]

Material		Wydłużenie [%]	Wytrzymałość [MPa]
Stal konwencjonalna		30 - 45	< 300
Stal HSS		10 - 45	300 - 1000
Stal AHSS			
	pierwsza generacja	5 - 30	400 - 1700
	druga generacja	45 - 70	900 - 1700
	trzecia generacja	obecnie w trakcie rozwoju	

Do grupy stali konwencjonalnej zalicza się materiały głównie o strukturze ferrytycznej, dość niskiej zawartości węgla oraz o podatności na obróbkę plastyczną. Granica plastyczności tych stali zazwyczaj nie przekracza 300 MPa. Do grupy stali **konwencjonalnych** można zaliczyć następujące gatunki stali [11, 12]:

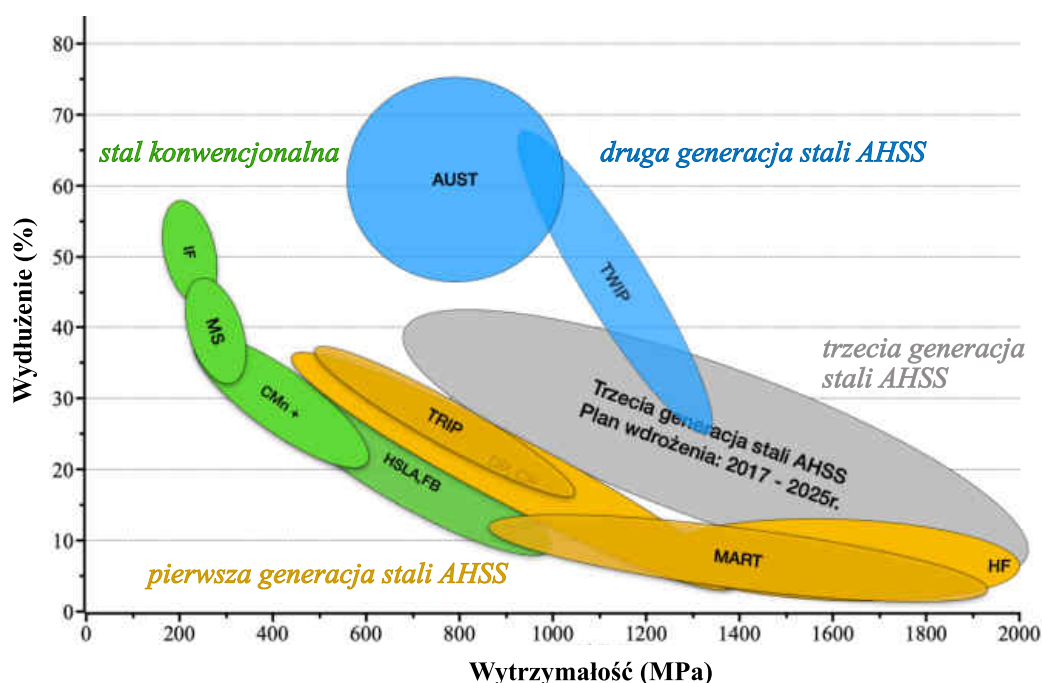
- MS (*ang. Mild Steel*) – stal ta często nazywana jest stalą “miękką”, dzięki niskiej zawartości węgla (0,02 – 0,12%) jest materiałem dobrze tłocznym i spawalnym. Obecnie w niewielkim stopniu jest wykorzystywana do budowy pojazdów, najczęściej wykorzystywana na detale głęboko tłoczne.
- IF (*ang. Interstitial – Free*) – stal zawierającą znikome stężenie pierwiastków międzywęzłowych C i N (~ 0,03%). Są to stale najbardziej plastyczne ze wszystkich materiałów w grupie stali konwencjonalnej. Wytrzymałość na rozciąganie stali IF zazwyczaj nie przekracza 300 MPa.
- IS (*ang. Isotropic Steel*) – cechą charakterystyczną stali IS jest wartość współczynnika anizotropii płaskiej (Δr), który przyjmuje wartość 0, gdy właściwości plastyczne stali nie zmieniają się wraz z kierunkiem ułożenia detali na taśmie lub arkuszu blachy względem kierunku walcowania. Brak anizotropii płaskiej jest pożądaną cechą podczas obróbki plastycznej, zwłaszcza podczas procesu głębokiego tłoczenia.

Stale **HSS** to materiały o niskim równoważniku węglowym, dlatego często wykorzystuje się je w konstrukcjach spawanych lub zgrzewanych. Grupa ta charakteryzuje się również większą wytrzymałością w stosunku do grupy stali konwencjonalnej, jednak ich ciągliwość jest zazwyczaj niższa. Granica plastyczności stali HSS przekracza 550 MPa. Do grupy stali HSS można zaliczyć następujące gatunki [4,12,13]:

- **C-Mn** (*ang. Carbon Manganese*) – są to stale o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, w których zawartość węgla mieści się poniżej 0,1%. Są to stale ogólnego zastosowania.
- **BH** (*ang. Bake Hardenable*) – to stale o zawartości węgla poniżej 0,03%, utwardzane w procesie wygrzewania lakieru po procesie malowania. Po tym procesie wytrzymałość stali BH wzrasta o ok. 40 MPa w zależności od gatunku;
- **IF-HS** (*ang. Interstitial Free High Strength*) – są to stale typu IF umacniane roztworowo poprzez zwiększenie stężenia pierwiastków P (do 0,03%), B (do 0,003%) oraz Mn (do 1,2%). Wytrzymałość na rozciąganie stali IF-HS może przekraczać 400 MPa;
- **HSLA** – stal charakteryzująca się drobnoziarnistą strukturą ferrytyczno-perlityczną, umacnianą przez dodatki stopowe takie jak: tytan, wanad, niob i chrom. Ograniczony poziom dodatków stopowych oraz niski ekwiwalent węglowy sprawia, że stal HSLA jest stalą dobrze spawalną [14,15]. Stal HSLA została opracowana głównie do wytwarzania części metodą tłoczenia, dlatego były one pierwszymi stalami o podwyższonej wytrzymałości stosowanymi na szeroką skalę w branży motoryzacyjnej [8]. Ponadto, ze względu na technikę wytwarzania, stale HSLA są tańsze w produkcji w stosunku do materiałów z grupy stali AHSS. Stal HSLA wykorzystywana jest do produkcji elementów struktur pojazdów drogowych, elementów podwozia, felg, podzespołów mechanizmów drzwiowych [16]. Ponadto, jest ona stosowana również w budowie podzespołów naczep i przyczep samochodów ciężarowych, co przyczynia się do zwiększenia ładowności środków transportu tego typu. Największe europejskie przedsiębiorstwa produkujące naczepy i przyczepy do samochodów ciężarowych stosują do budowy struktur nośnych stale HSLA.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że pomimo wytrzymałości niektórych gatunków stali HSLA przekraczającej 1000 MPa, nie są one jednak klasyfikowane jako stal AHSS. W przeszłości, stal o wytrzymałości powyżej 550 MPa zaliczana była do grupy stali AHSS, jednak obecnie istnieją gatunki stali AHSS o wytrzymałości niższej niż 550 MPa, dlatego klasyfikacja do grupy stali AHSS ze względu na wytrzymałość nie jest już jednoznaczna [10].

Obecnie częściej wykorzystywanym kryterium klasyfikacji stali stosowanych w przemyśle samochodowym jest złożoność mikrostruktury oraz specyficzne cechy danego gatunku stali. Na rys. 3 przedstawiono podział stali stosowanych w motoryzacji w zależności od ich struktury krystalicznej w funkcji ciągliwości i wytrzymałości.



Rys. 3. Porównanie różnych gatunków stali stosowanych w motoryzacji z uwzględnieniem ich właściwości mechanicznych w postaci wydłużenia i wytrzymałości na rozciąganie [10]

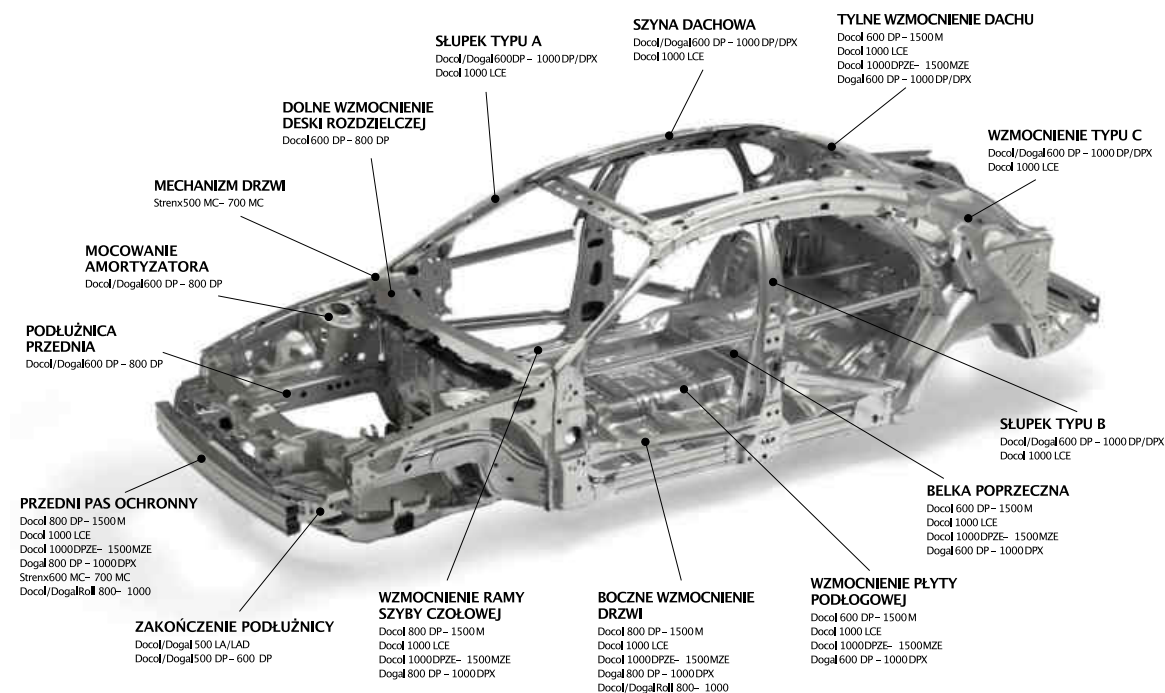
Grupa stali AHSS charakteryzuje się wielofazową mikrostrukturą składającą się głównie z twardych wysp martenzytycznych, bainitu, austenitu oraz osnowy ferrytycznej, która zapewnia dobrą ciągliwość. Stale w tej grupie charakteryzują się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi, ich wytrzymałość na rozciąganie zazwyczaj przekracza 780 MPa. Większość gatunków stali AHSS produkowana jest jako blachy i taśmy, zimno i gorącowałcowane. W zależności od chronologii powstawania gatunków stali AHSS można wyróżnić trzy generacje stali AHSS. Do **pierwszej generacji** stali AHSS zalicza się stale

dwufazowe DP (*ang. Dual Phase*), stale typu TRIP (*ang. Transformation Induced Plasticity*), stale CP (*ang. Complex Phase*) oraz stale MART (*ang. Martensitic Steel*). Są to stale o wysokiej wytrzymałości przy niższym koszcie produkcji w stosunku do stali AHSS drugiej generacji. Stale pierwszej generacji są stosowane na szeroką skalę w przemyśle motoryzacyjnym [3]. Postęp w rozwoju stali austenitycznej z wysoką zawartością dodatków stopowych takich, jak chrom, nikiel, mangan, przyczynił się do poprawy właściwości mechanicznych w porównaniu do stali pierwszej generacji. Były one prekursorem umożliwiającym dalszy rozwój kolejnej - **drugiej generacji** stali AHSS. Materiały te były odpowiedzią na potrzeby przemysłu w zakresie elementów głęboko tłoczonych. Efekt zwiększenia właściwości plastycznych uzyskano dzięki wprowadzeniu odpowiednich dodatków stopowych. Niestety, spowodowało to zwiększenie kosztów produkcji, przez co stale AHSS drugiej generacji znajdują zastosowanie wyłącznie w specyficznych aplikacjach [3,4]. Do drugiej generacji stali AHSS zalicza się stale: TWIP (*ang. Twinning Induced Plasticity*), L-IP (*ang. Light-Weight Induced Plasticity*) oraz stale AUST (*ang. Austenitic Stainless Steel*).

1.1.1. Stale AHSS pierwszej generacji

Stal typu **DP** posiada strukturę dwufazową, ferrytyczną–martenzytyczną. Miękka faza ferrytyczna odpowiada za właściwości plastyczne, dzięki temu stale typu DP osiągają wydłużenie rzędu kilkunastu procent. Z kolei, twarda faza martenzytyczna odpowiada za wysoką wytrzymałość stali DP. Zakres wytrzymałości dla tej grupy stali AHSS, produkowanych seryjnie i dostępnych na rynku, wynosi od 400 do 1400 MPa. Stal dwufazowa wytwarzana jest w procesie chłodzenia po procesie walcowania na gorąco (dla blach gorącowalcowanych) lub ciągłym wyżarzaniu (dla blach zimnowalcowanych). Stal DP to materiał przeznaczony do wytwarzania części z blach metodą tłoczenia. Jest to materiał dobrze spawalny przy niższych poziomach wytrzymałości, zaś przy wyższych, wymaga doboru odpowiednich parametrów spawalniczych oraz większego doświadczenia w procesie spawania. Jest to materiał typowo wykorzystywany na elementy absorbujące energię mechaniczną w wyniku procesu zgniatania. Posiada korzystny stosunek granicy plastyczności do granicy wytrzymałości na rozciąganie (tzw. zapas plastyczności). Zależność ta jest szczególnie istotna z uwagi na przeznaczenie części stosowanych jako struktury energochłonne ulegające deformacji sprężysto-plastycznej podczas zderzenia [13,17]. Stal DP wykorzystywana jest

w motoryzacji do produkcji elementów bezpiecznych, tj. chroniących pasażerów i energochłonnych. Wykonuje się z niej np. kolumnowe absorbery energii, przednie belki, słupki boczne typu B, felgi oraz wzmocnienia drzwi, przykładowe zastosowanie tej stali przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat poglądowy ilustrujący wykorzystanie różnych gatunków stali wysokowytrzymałych w konstrukcji pojazdu osobowego [22]

Stale CP charakteryzują się strukturą ferrytyczno-bainityczną, umacnianą przez twardą fazę martenzytyczną, austenit i perlit. Skład chemiczny stali CP zbliżony jest do stali DP i do stali TRIP, z tą różnicą, że jej skład uzupełniony jest jeszcze o niob, tytan i wanad. W porównaniu do stali DP stale CP charakteryzują się wyższą granicą plastyczności, ale niższą ciągliwością [3]. Zaletami stosowania stali CP jest jej zdolność do pochłaniania energii mechanicznej w wyniku odkształcenia, która jest wyższa od wcześniej omawianych stali DP. Cecha ta czyni stale typu CP właściwymi do produkcji takich elementów, jak słupki boczne typu B czy zderzaki w pojazdach drogowych. Ponadto, stal CP charakteryzuje się wytrzymałością resztkową po obciążeniu uderowym [17]. Stal CP wykazuje również dobrą odporność na obciążenia zmęczeniowe, dlatego stosowana jest do wytwarzania podzespołów zawieszenia pojazdów drogowych [4].

Stale manganowo–borowe typu **HF** to materiały konstrukcyjne przeznaczone do hartowania w procesie tłoczenia. Zawartość węgla w tych stalach nie przekracza 0,25%. Za dobrą hartowność stali odpowiada bor, którego udział w strukturze mieści się w przedziale 0,001 – 0,005%. Najpopularniejszym gatunkiem stali HF jest stal 22MnB5, która jest produkowana przez większość europejskich hut. Zaletą tej stali jest dość niski koszt w stosunku do innych materiałów, aczkolwiek ilość energii dostarczonej do późniejszego procesu obróbki plastycznej jest przyczyną stosowania stali wyłącznie w najbardziej wymagających podzespołach konstrukcji pojazdu takich, jak np. słupek boczny typu „B”, elementy podłogi czy wzmocnienia dachowe. Typowy proces wytwarzania części z tej grupy stali przedstawia się następująco: wcześniej przygotowane formatki nagrzewane są w piecach do temperatury 850°C, następnie są one transportowane do oprzyrządowania tłocznego (rys. 5) wyposażonego w kanały chłodzące, pozwalające na kontrolowane chłodzenie detalu po zamknięciu prasy. Chłodzenie jest zazwyczaj przeprowadzane z szybkością większą niż 50°C/s. Struktura materiału po procesie obróbki jest zbliżona do struktury martenzytycznej, a wytrzymałość materiału może przewyższać wartość 2000 MPa (*np. Docol PHS 2000*). Ze względu na wysoką twardość materiału po obróbce nie jest możliwe seryjne mechaniczne okrawanie wytłoczonych detali, dlatego cięcie mechaniczne zastępuję się technologią cięcia laserowego, co dodatkowo podnosi koszty produkcji, ale zapewnia wyższą jakość produkowanych elementów. W związku z tym, wraz z wdrażaniem na rynek kolejnych gatunków trzeciej generacji stali AHSS, udział stali HF będzie prawdopodobnie stopniowo zmniejszany, głównie ze względu na wysoką energochłonność procesu podgrzewania i związane z tym dodatkowe koszty produkcji [10,18].



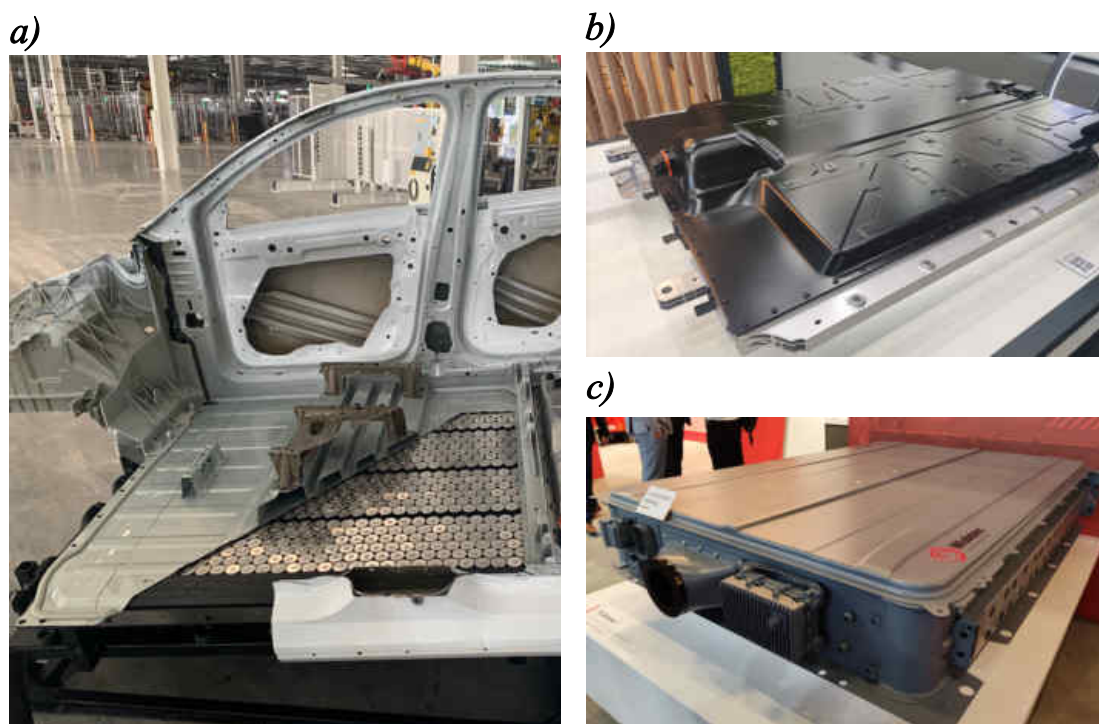
Rys. 5. Widok oprzyrządowania i wytłoczki do hartowania w procesie tłoczenia stali typu HF [19]

Mikrostruktura stali **TRIP** składa się z ferrytu, twardej fazy bainitycznej oraz austenitu szczątkowego, którego udział w mikrostrukturze jest zazwyczaj większy niż 5%. Zawartość węgla w zależności od danego gatunku mieści się w przedziale od 0,1 do 0,4%. Dodatki stopowe takie jak tytan, nikiel i wanad są dodawane w celu zwiększenia wytrzymałości. Stale TRIP charakteryzuje wysoka wytrzymałość przy zachowaniu wysokiej ciągliwości, a ponadto cechuje się ona wysoką wartością współczynnika umocnienia odkształceniowego n w porównaniu do innych gatunków z grupy AHSS. Wyżej wymienione cechy stali TRIP są następstwem indukowanej odkształceniem plastycznym przemiany austenitu szczątkowego w martenzyt (tzw. Efekt TRIP). Efekt ten jest dodatkowo intensyfikowany w warunkach deformacji plastycznej, zachodzącej z dużymi szybkościami odkształcenia np. podczas zderzenia pojazdów. Dlatego stale TRIP są materiałem pożądanym przez przemysł motoryzacyjny i często wykorzystywanym na elementy absorbujące energię mechaniczną [11,20]. Stal TRIP w porównaniu do innych stali wysokowytrzymałych, na przykład stali HSLA, posiada znacząco wyższą wytrzymałość zmęczeniową. Z kolei, konieczność zachowania w strukturze austenitu szczątkowego jest przyczyną zwiększenia zawartości węgla w stali, co skutkuje ograniczoną spawalnością stali TRIP [4,21].

Stale martenzytyczne **MART** wytwarzane są na drodze hartowania – szybkiego chłodzenia stali uprzednio nagrzanej do temperatury powyżej przemiany austenitycznej w celu przekształcenia większości austenitu w martenzyt. Ich mikrostruktura złożona jest głównie z martenzytu z niewielkim udziałem struktury ferrytycznej i bainitycznej. Udział węgla w tej strukturze ma zadanie zwiększenia hartowności oraz wytrzymałości. Inne dodatki stopowe takie, jak mangan, chrom, molibden, bor, wanad oraz nikiel dodawane są w różnych proporcjach w zależności od gatunku w celu poprawienia hartowności. Stale MART charakteryzują się wysoką granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie przekraczającą 1000 MPa. Przykładem takiej stali jest Docol 1700M szwedzkiego producenta stali SSAB, gdzie wartość 1700 oznacza minimalną granicę wytrzymałości na rozciąganie. Ze względu na dość niskie wydłużenie względne (poniżej 5%), proces obróbki plastycznej tej stali metodą tłoczenia jest znacząco ograniczony. Z tego względu, często stosuje się operację podgrzewania przed procesem tłoczenia stali typu MART w celu zwiększenia podatności na odkształcenie plastyczne. Technologia często wykorzystywaną w procesie obróbki stali martenzytycznej jest technologia profilowania za pomocą rolek formujących. Obecnie dzięki

maszynom sterowanym numerycznie istnieje możliwość kształtowania półfabrykatów o zmiennym przekroju oraz produkcji profili o przekroju zamkniętym – profilowanych i łączonych za pomocą technologii spawania laserowego lub zgrzewania indukcyjnego [4]. Stal martenzytyczna wykorzystywana jest także do produkcji przednich i tylnych pasów bezpieczeństwa, wzmocnienia dachów i drzwi oraz elementów struktur siedzeń w pojazdach drogowych (rys. 4).

W ostatnich latach, wraz ze wzrostem zainteresowania pojazdami elektrycznymi, stal AHSS wykorzystywana jest do budowy elementów konstrukcyjnych osłaniających pakiety bateryjne, gdzie głównie pełni funkcję zabezpieczającą przed uszkodzeniami zewnętrznymi, przykłady aplikacji stali typu AHSS przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przykłady wykorzystania stali AHSS w konstrukcjach poszyć pakietów bateryjnych:
a) w samochodzie Tesla Y [23]; b) w pojeździe ciężarowym (fot. Paweł Prochenka, Targi Pojazdów Użytkowych IAA, Hannover 2022 r.) oraz c) w lokomotywie o napędzie elektrycznym (fot. Paweł Prochenka, Targi Pojazdów Szynowych, INNOTRANS, Berlin 2022 r.)

1.1.2. Stale AHSS drugiej generacji

Stale TWIP posiadają jednofazową, austenityczną strukturę zawierającą wysoką zawartość manganu w zakresie od 22 do 30%. Zawartość węgla w stali TWIP jest mniejsza niż 1%. Stale TWIP cechuje wysoka wytrzymałość przekraczająca 1000 MPa oraz ciągliwość

zawierająca się w przedziale od 60 do 90%. Powyższe cechy stal TWIP zawdzięcza występowaniu dwóch mechanizmów odkształceniowych, tj. efektu TRIP oraz efektu TWIP (bliźniakowanie mechaniczne). Stwierdza się, że w początkowych etapach odkształcenia, zjawisko bliźniakowania jest głównym mechanizmem deformacji, który ustępuje mechanizmowi TRIP w miarę postępującego odkształcania plastycznego. Obydwa wspomniane mechanizmy występują także w trakcie deformacji plastycznej zachodzącej z dużymi szybkościami odkształcenia, przy czym jak wykazano w [24] niektóre stale TWIP wykazują ujemną wrażliwość na szybkość odkształcenia. Unikatowa kombinacja właściwości wytrzymałościowych i plastycznych stali TWIP/TRIP wynikająca z występowania ww. mechanizmów umocnienia odkształceniowego czyni te stale właściwym materiałem konstrukcyjnym przeznaczonym do produkcji elementów absorbujących energię mechaniczną. Jednakże ze względu na wysokie koszty produkcji stali typu TWIP nie jest ona obecnie powszechnie stosowana [3, 4, 11, 24].

Stale AUST-SS (*ang. Austenitic Stainless Steels*) to austenityczne stale nierdzewne o zawartości węgla nie przekraczającej 0,1% oraz obecności dodatków stopowych takich, jak chrom 18–20% oraz niob 8-10%. Nierdzewna stal austenityczna charakteryzuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną przy wysokiej ciągliwości często przekraczającą 40%. Stal AUST-SS jest materiałem dobrze tłocznym, posiada współczynnik umocnienia n na poziomie 0,5, którego wartość jest wyższa niż w przypadku stali DP lub stali TRIP. Cechami charakterystycznymi stali AUST-SS jest antykorozyjność, dobry stosunek wytrzymałości do ciągliwości oraz dobre parametry wytrzymałości zmęczeniowej. Ze względu na wysoki koszt materiału nie jest ona stosowana na szeroką skalę w branży motoryzacyjnej. Szacuje się, że na jeden pojazd przypada ok. 12 kg stali nierdzewnej, przy czym trend ten może ulec zmianie za sprawą amerykańskiej marki samochodów elektrycznych TESLA. Firma ta zaprezentowała w 2019 r. koncepcję pojazdu o nazwie *Cybertruck*, którego konstrukcja nośna wraz z poszyciem wykonana jest w większości z austenitycznej stali nierdzewnej [4,25].

1.1.3. Stale AHSS trzeciej generacji

Stale AHSS trzeciej generacji są grupą materiałów obecnie rozwijaną i charakteryzującą się właściwościami stanowiącymi kompromis pomiędzy wytrzymałością i plastycznością pierwszej i drugiej generacji stali AHSS, ale przy kosztach produkcji niższych niż w przypadku

stali AHSS drugiej generacji. Wymagania stawiane stali trzeciej generacji to przede wszystkim [26]:

- niski ekwiwalent węglowy w celu zwiększenia spawalności;
- poprawa ciągliwości, a co za tym idzie zwiększenie zdolności do pochłaniania energii mechanicznej w wyniku deformacji plastycznej;
- zmniejszenie kosztów produkcji poprzez ograniczenie ilości dodatków stopowych – niższy koszt może pozwolić na zmniejszenie udziału w rynku aluminium oraz stali przeznaczonych do hartowania w procesie tłoczenia (HF);
- przetwarzanie stali zgodnie z dostępnymi technologiami obróbki plastycznej stalowych blach oraz możliwość wykonywania bardziej skomplikowanych kształtów z wykorzystaniem technologii tłoczenia.

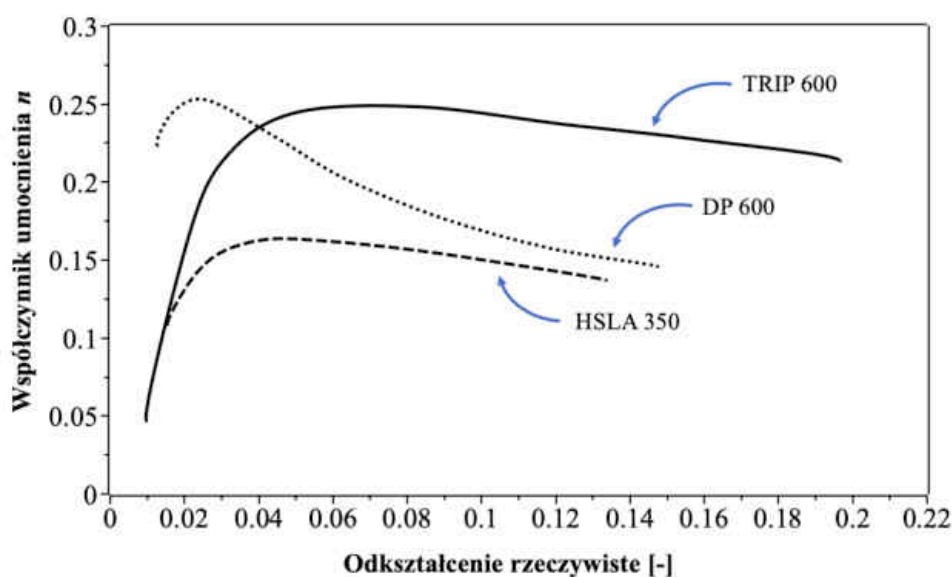
W celu osiągnięcia wymaganej wytrzymałości i ciągliwości ważna jest kontrola produkcji stali AHSS trzeciej generacji, gdyż od niej głównie zależy koszt materiału, który może być decydującym kryterium stosowalności tej grupy stali w przemyśle motoryzacyjnym na szeroką skalę [4]. Program wdrożenia stali obejmuje okres 2017 – 2025 r. i w okresie przygotowywania niniejszej rozprawy na rynku europejskim istnieje niewiele gatunków stali AHSS trzeciej generacji produkowanych seryjnie. Jednym z przykładów jest stal typu **DH** (*ang. Dual Phase High Ductility*), która charakteryzuje się strukturą ferrytyczno-martenzytyczną z dodatkiem austenitu szczątkowego [27]. Ze względu na dość wysoką ciągliwość i wartość współczynnika umocnienia (zbliżonego do stali TRIP) jest to materiał podatny na obróbkę plastyczną. Dzięki ograniczeniu zawartości węgla w składzie chemicznym jest to stal o lepszej spawalności w stosunku do stali AHSS pierwszej generacji typu DP, co jest pożądane przez przemysł produkcyjny. Obecnie, oferowaną stalą AHSS trzeciej generacji o najwyższej wytrzymałości jest *Fortiform 1180* o wytrzymałości na rozciąganie R_m w zakresie 1180-1330 MPa oraz wydłużeniu 13% [28].

1.1.4. Potencjał wykorzystania stali AHSS w procesie wytwarzania struktur energochłonnych

Do głównych zalet stali AHSS można zaliczyć przede wszystkim jej wytrzymałość. Zastosowanie cienkich blach o wysokiej wytrzymałości daje inżynierom potencjał projektowy w postaci zmniejszania grubości stosowanych elementów, co skutkuje zmniejszaniem masy

pojazdów. Potencjał optymalizacyjny produktów wykonanych ze stali AHSS klasyfikuje ten materiał na tym samym poziomie co wysokowytrzymałe stopy aluminium stosowane w aplikacjach, w których zmniejszanie masy przy zachowaniu bezpieczeństwa biernego jest podstawowym założeniem projektowym [4].

Stale o zwiększonej wytrzymałości wykazują większe **umocnienie odkształceniowe** w stosunku do stali konwencjonalnej. Wysoka wartość współczynnika umocnienia n przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości stali AHSS podczas postępującego odkształcenia plastycznego. Jest to pozytywne zjawisko w aspekcie projektowania struktur energochłonnych [4]. Na rys. 7 przedstawiono wartości współczynnika umocnienia dla stali HSLA 350, DP 600 i TRIP 600. Stal HSLA ma najniższy współczynnik umocnienia, zaś stal DP wykazuje najwyższą wartość współczynnika n we wczesnym etapie odkształcenia plastycznego, zależność ta następnie gwałtownie spada dla większych wartości odkształcenia. W przypadku stali TRIP zjawisko umacniania odkształceniowego występuje przy wyższych wartościach odkształcenia niż w przypadku stali DP, jednakże wraz ze wzrostem wielkości odkształcenia wartość współczynnika n nie spada tak gwałtownie, jak dla stali DP.



Rys. 7. Zmiany wartości współczynnika umocnienia odkształceniowego n w funkcji wielkości odkształcenia dla stali HSLA 350, DP 600 i TRIP 600 [10]

Istotną cechą stali AHSS jest **wrażliwość na szybkość odkształcenia** określaną za pomocą wartości parametru m . Analizując dostępną literaturę można stwierdzić, że stal typu DP ze względu na szeroką stosowalność w branży motoryzacyjnej jest najczęściej badanym

materiałem z grupy AHSS w zakresie reakcji mechanicznej na rozciągające obciążenia dynamiczne. Wiele zespołów naukowych w swoich pracach [29–31] wykazało pozytywną reakcję na wzrost szybkości odkształcenia stali DP. Li i inni [32] podjęli także tematykę badań dynamicznych stali DP o wytrzymałości powyżej 1000 MPa (DP 1200), dowodząc, że wysoka wrażliwość badanej stali na szybkość odkształcenia jest efektem dominującego odkształcenia struktury martenzytycznej po przekroczeniu krytycznej wartości szybkości odkształcenia $500 - 700 \text{ s}^{-1}$. Oliver i inni [33] prowadzili badania ewolucji mikrostruktury stali DP 800 i TRIP 800 w warunkach obciążenia quasi-statycznego (10^{-3} s^{-1}) i dynamicznego (200 s^{-1}). Stal DP wykazała większą ciągliwość w warunkach statycznych niż w dynamicznych, zaś stal TRIP odwrotnie, ciągliwość wzrastała wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia. Autorzy uzasadniali to zjawisko zwiększeniem wydłużenia ziaren ferrytu w stali TRIP przy wyższych szybkościach odkształcenia, zaś w stali DP zjawisko wydłużenia ziaren ferrytu występowało jedynie podczas deformacji quasi-statycznej. W pracy [34] autorzy również porównali właściwości mechaniczne stal DP i TRIP w szerokim zakresie szybkości odkształcenia $10^{-3} \text{ s}^{-1} \div 1250 \text{ s}^{-1}$ i temperatury od -100 do $235 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Wykazano, że stal DP charakteryzuje się większą wrażliwością na szybkość odkształcenia w stosunku do stali TRIP, a reakcja stali DP na obciążenia dynamiczne jest typowa jak dla większości metali, tj. jej umocnienie jest głównie związane ze zjawiskami dyslokacyjnymi występującymi w materiale. Umocnienie stali TRIP jest ściśle zależne od temperatury, zaś stal DP jest praktycznie niewrażliwa na jej zmianę. W cytowanej pracy porównano również zdolność do pochłaniania energii mechanicznej w wyniku odkształcenia plastycznego dla obydwóch typów stali. Stal TRIP 700 wykazała wyraźnie wyższą zdolność do absorpcji energii mechanicznej niż stal DP, przy czym dla zakresu odkształcenia plastycznego do 10%, to stal DP wykazuje wyższą energochłonność zarówno w zakresie obciążeń quasi-statycznych, jak i dynamicznych. Zachowanie mechaniczne stali DP wydaje się zatem być pożądane w wielu zastosowaniach inżynierskich, w których, ze względu na bezpieczeństwo pasażerów, tylko ograniczona deformacja struktur energochłonnych nadwozia pojazdu jest dopuszczalna [33,34]. Z kolei, w pracy [35] zbadano właściwości mechaniczne stali DP o wytrzymałości poniżej 1000 MPa w warunkach deformacji plastycznej zachodzącej z szybkością odkształcenia sięgającą poziomu aż 3200 s^{-1} . Najwyższy poziom naprężenia plastycznego płynięcia stali DP osiągnięto dla szybkości odkształcenia 1000 s^{-1} . Powyżej tej wartości wytrzymałość była odwrotnie proporcjonalna do wzrostu

szybkości odkształcenia. Jej wartość utrzymywała się na stałym poziomie dla szybkości odkształcenia w zakresie do 3200 s^{-1} . Innymi pracami związanymi z tematyką badania stali DP, CP i TRIP w zakresie dużych szybkości odkształcenia są prace [31,36–46], w których potwierdzono wyżej sformułowane wnioski.

W literaturze dotyczącej stali AHSS poświęcono stosunkowo niewiele uwagi reakcjom materiału na obciążenia dynamiczne stali martenzytycznych. W dostępnych publikacjach przedstawiono dane doświadczalne świadczące o pozytywnej odpowiedzi mechanicznej stali martenzytycznych na wzrost szybkości odkształcenia. Stal martenzytyczna, jednakże ze względu na bardzo wysoką wytrzymałość, jest mniej wrażliwa na szybkość odkształcenia niż stal DP. Największą różnicę zaobserwowano dla zakresu dużych szybkości odkształcenia [47–50]. Costa i inni [47] podjęli tematykę badań stali martenzytycznej w zakresie szybkości odkształcenia zmieniającej się w przedziale $10^{-3} \div 10^3\text{ s}^{-1}$. Badania przeprowadzono dla dwóch gatunków stali martenzytycznej: M 1200 i M 1400. Największy wzrost wytrzymałości, dla obydwu materiałów, zaobserwowano dla poziomu szybkości odkształcenia 10^3 s^{-1} . Dla średniego zakresu szybkości odkształcenia różnica była niewielka, zwłaszcza w przypadku stali M 1400. Oprócz tego, w całym zakresie osiągniętych szybkości odkształcenia, zaobserwowano wzrost naprężenia plastycznego płynięcia dla prostopadłej orientacji próbek materiałowych względem kierunku walcowania. Sen i inni [48] prowadzili natomiast badania stali Docol 1200M i Docol 1400M dla średniego poziomu szybkości odkształcenia z uwzględnieniem wpływu temperatury zmieniającej się w zakresie $24 - 600^\circ\text{C}$. Zaobserwowali oni spadek plastyczności oraz wytrzymałości ww. gatunków stali wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku stali Docol 1200M wydłużenie całkowite w temperaturze 300°C wzrosło ponad dwukrotnie w stosunku do badań prowadzonych w temperaturze 24°C , przy czym do 500°C utrzymywało się ono na zbliżonym poziomie i nieznacznie wzrosło w 600°C . Autorzy zaproponowali zatem temperaturę 300°C jako optymalną dla procesu profilowania na gorąco skomplikowanych kształtów wykonanych z wyżej wymienionej stali. Z kolei, autorzy pracy [50] podjęli tematykę badania stali typu HF 22MnB5. Po procesie obróbki cieplnej uzyskano stal o strukturze martenzytycznej, której właściwości mechaniczne przeanalizowano pod kątem wpływu szybkości odkształcenia, zmieniającego się w zakresie $10^{-3} - 10^3\text{ s}^{-1}$. Rezultaty badań doświadczalnych potwierdziły dodatnią wrażliwość stali HF 22MnB5 na szybkość

odkształcenia, a najwyższy poziom naprężenia plastycznego płynięcia uzyskano dla szybkości odkształcenia wynoszącej 10^3 s^{-1} .

Na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego stwierdzono, że połączenia spawane laserowo wykonane z blach ze stali DP są najczęstszym przedmiotem badań w szerokim zakresie szybkości odkształcenia [7, 51, 52]. Z kolei, publikacje dotyczące laserowych połączeń spawanych w stalach martenzytycznych są rzadziej spotykane. Prawdopodobną przyczyną takiego stanu są liczne problemy występujące podczas spawania stali martenzytycznych, wynikające z ich podatności na pękanie w obszarze przylegającym do strefy wpływu ciepła [17, 53, 54].

W literaturze można znaleźć wiele publikacji związanych z oceną wytrzymałości mechanicznej połączeń spawanych laserowo wykonanych ze stali o zwiększonej wytrzymałości. Niestety zdecydowana większość z tych publikacji dotyczy badań złącz spawanych poddanych obciążeniom quasi-statycznym. Danyang i inni w pracy [55] zbadali wytrzymałość doczołowego złącza spawanego laserem impulsowym o mocy 400 W, wykonanego ze stali DP600 o grubości 0,7 mm dla zakresu szybkości odkształcenia od $0,001 \text{ s}^{-1}$ do 1133 s^{-1} . Na podstawie przeprowadzonych prac potwierdzono wrażliwość materiału rodzimego i spoiny na szybkość odkształcenia – największą zmianę zaobserwowano w zakresie szybkości odkształcenia od 10^1 s^{-1} do 10^3 s^{-1} . Wykazano także, że ciągliwość złącza spawanego zmniejsza się w stosunku do ciągliwości materiału rodzimego. Dodatkowo, porównano wartości zaabsorbowanej energii mechanicznej dla 10% odkształcenia, w wyniku czego stwierdzono, że energia odkształcenia złącza spawanego była wyższa w porównaniu do energii odkształcenia materiału rodzimego.

1.1.5. Czynniki technologiczne ograniczające stosowalność stali o zwiększonej wytrzymałości

Pośród wielu zalet stosowania stali AHSS istnieje jednak wiele trudności związanych z jej wykorzystaniem w produkcji seryjnej. Są to głównie problemy związane z cięciem, obróbką plastyczną oraz spawaniem. Problemy związane ze spawaniem stali AHSS stanowią jeden z ważniejszych problemów ich zastosowania w budowie pojazdów. Aby zapewnić odpowiednią jakość połączenia spawanego, właściwości fizyko-mechanicznych materiału w obszarze złącza spawanego powinny być możliwie zbliżone do właściwości materiału

rodzimego łączonych elementów. Zawartość węgla oraz innych dodatków stopowych w stalach jest zwiększana wraz ze wzrostem wytrzymałości stali, a złożona struktura fazowa stali AHSS w porównaniu do stali konwencjonalnych skutkuje zwiększeniem jej wrażliwości na wprowadzane ciepło podczas procesu spawania. Specjalne procesy obróbki cieplnej wykorzystywane na etapie produkcji stali sprawiają, że spawalność stali AHSS jest ograniczona, zwłaszcza gatunków o wytrzymałości powyżej 1000 MPa [17,56,57]. Podczas procesu spawania laserowego zachodzą procesy metalurgiczne charakteryzujące się lokalnym i bardzo silnym nagrzewaniem materiału ($> 1000^{\circ}\text{C/s}$) oraz bardzo szybkim chłodzeniem. Skutkuje to obniżeniem jakości uzyskiwanego połączenia, wynikającej z porowatości spoiny lub jej pękania. Dlatego stosuje się dodatkowe zabiegi cieplne, które poprawiają wytrzymałość i ciągliwość połączenia, zwłaszcza w przypadku spawania stali o wysokiej zawartości węgla [58]. W związku z tym, do wygrzewania wykorzystywane są piece grzewcze, układy do nagrzewania indukcyjnego, jak również technologie laserowe. Wykorzystanie źródeł laserowych typu AMB, głowic z optyką umożliwiającą tworzenie dwóch płamek procesowych lub dwóch głowic spawalniczych pozwala na wykorzystanie wiązki laserowej (zazwyczaj rozogniskowanej) do wstępnego podgrzewania materiału, jak i wygrzewaniu po spawaniu [52]. Wygrzewanie po spawaniu jest głównie realizowane w celu poprawy ciągliwości połączenia spawanego. W pracy [59] Forouzan i inni zastosowali dodatkowy zabieg wygrzewania po spawaniu doczołowego złącza spawanego o grubości 5,5 mm ze stali Strenx 960. Proces spawania przeprowadzono za pomocą lasera typu fiber o maksymalnej mocy 5 kW, a do podgrzewania, dodatkowe indukcyjne elementy grzejne. Wykazano, że wygrzewanie po spawaniu zwiększyło ciągliwość połączenia o 80% w stosunku do złącza spawanego bez dodatkowej obróbki cieplnej, przy zachowaniu zbliżonej wytrzymałości. W pracy [60] przed procesem spawania laserowego zastosowano wstępne podgrzewanie nierdzewnej stali martenzytycznej do maksymalnej temperatury 121°C . Zaobserwowano wzrost ciągliwości połączenia spawanego oraz spadek wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do próbek bez dodatkowej obróbki cieplnej.

Dużym problemem technologicznym jest także cięcie mechaniczne formatek ze stali o wyższych parametrach wytrzymałościowych. Podczas ich cięcia dochodzi do nadmiernego zużywania się narzędzi tnących, a w konsekwencji do zwiększenia kosztów związanych z regeneracją narzędzi na etapie produkcji. Przykładem materiału, w przypadku którego nie

praktykuje się okrawania mechanicznego ze względu na wytrzymałość materiału jest stal manganowo – borowa. Jest to stal, która po hartowaniu w procesie tłoczenia (*hotforming*) może uzyskiwać wytrzymałość na rozciąganie ponad 2000 MPa. Tradycyjne metody okrawania i wykrawania otworów nie są więc stosowane dla tego materiału, dlatego konieczne jest stosowanie innych technologii cięcia np. technologii cięcia laserowego 3D do wycinania otworów i konturów detali [61].

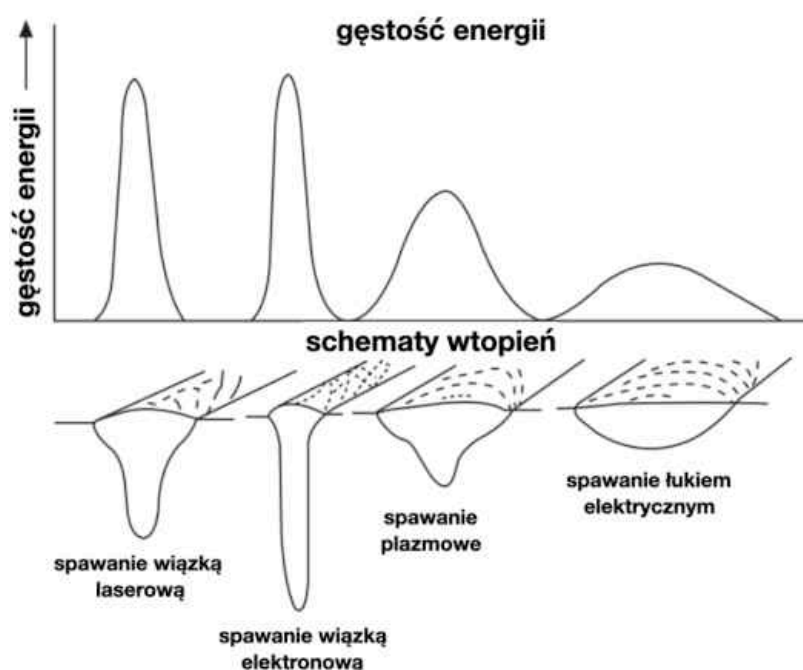
Proces tłoczenia jest najczęściej wykorzystywaną technologią w produkcji podzespołów dla branży motoryzacyjnej. Jedną z głównych różnic pomiędzy tłoczeniem stali konwencjonalnej i stali o wysokiej wytrzymałości jest ilość energii niezbędnej do przeprowadzenia takiego procesu. W przypadku stali AHSS wykorzystywane prasy muszą posiadać większą siłę nacisku, co powoduje wzrost kosztów utrzymania parku maszynowego oraz zwiększa koszty zakupu maszyn i urządzeń. Ponadto, wyzwaniem dla konstruktorów matryc do tłoczenia stali AHSS pierwszej generacji jest opracowanie poprawnie działającego oprzyrządowania, uwzględniającego, m.in. zjawisko sprężynowania powrotnego i wysoką wytrzymałość materiału. Wszystko to sprawia, że przyrządy tłoczne do bardziej skomplikowanych konstrukcji, zwłaszcza przyrządy wielotaktowe są drogie i często zawodne [10].

1.2. WYKORZYSTANIE WIĄZKI LASEROWEJ DO ŁĄCZENIA STALOWYCH BLACH

Spawanie laserowe coraz częściej wykorzystywane jest w firmach produkcyjnych wykorzystujących nowoczesne rozwiązania technologiczne. Technika spawania laserowego jest nie tylko alternatywą dla konwencjonalnych technologii łączenia, ale oferuje inżynierom większą elastyczność w doborze łączonych materiałów, zwłaszcza materiałów trudno spawalnych lub niemożliwych do spawania z wykorzystaniem innych technologii spawalniczych. Dodatkowo, spawanie laserowe jest procesem wydajniejszym w stosunku do konwencjonalnych technologii łączenia [62].

Najwyższą jakość połączenia spawanego uzyskuje się poprzez zminimalizowanie różnic we właściwościach fizyko-mechanicznych spoiny, strefy wpływu ciepła oraz materiału rodzimego. Dlatego istotne jest, aby proces spawania zachodził przy możliwie najmniejszej ilości energii cieplnej wprowadzanej do materiału spawanego. Osiąga się to głównie dzięki stosowaniu technologii spawania o dużej gęstości mocy takich, jak spawanie laserowe lub

spawanie wiązką elektronów. Na rys. 8 schematycznie przedstawiono porównanie gęstości mocy i geometrii wtopienia dla różnych metod spawalniczych. Skupienie wiązki laserowej na małej powierzchni (rzędu dziesiątych części milimetra kwadratowego) umożliwia uzyskiwanie koncentracji energii na poziomie $10^6 - 10^7 \text{ W/cm}^2$. Tak duża gęstość energii wiązki laserowej powoduje powstawanie dużych gradientów temperatur w miejscu jej oddziaływania, co skutkuje ograniczeniem wielkości strefy przetopionego materiału oraz strefy wpływu ciepła [57].



Rys. 8. Odwzorowanie graficzne wpływu wartości gęstości energii dla typowych źródeł spawalniczych w stosunku do geometrii wtopienia [63]

1.2.1. Czynniki ograniczające zakres stosowalności technologii spawania laserowego do łączenia stalowych blach

W przypadku spawania doczołowego wiązką laserową bez stosowania dodatkowego materiału spoinowego, najistotniejszym ograniczeniem stosowalności technologii spawania laserowego jest uzyskanie odpowiedniej jakości powierzchni ciętych materiałów oraz stałej szerokości szczeliny pomiędzy spawanymi blachami. W zależności od wymagań stawianym złączom spawanym szerokość ta zazwyczaj nie powinna przekraczać 5% grubości spawanych blach. Zbyt szeroka szczelina może doprowadzić do powstawania porowatości spoin oraz podtopień lica, co może skutkować niską wytrzymałością połączenia oraz brakiem przetopienia

materiału [62]. Wiele publikowanych prac dotyczących badań połączeń spawanych laserowo ogranicza się do badań technologicznych materiału, którego krawędzie przed spawaniem są obrabiane mechanicznie. Jest to korzystny zabieg ze względu na uzyskanie stałej szczeliny pomiędzy spawanymi blachami, jednak takie podejście jest bardzo rzadko stosowane w produkcji seryjnej, w której najczęściej wykorzystuje się technologię cięcia mechanicznego lub laserowego. Cięcie mechaniczne jest powtarzalnym procesem, jednak wraz ze wzrostem grubości ciętych materiałów oraz zużyciem narzędzi tnących, chropowatość powierzchni ciętych ulega zmianie. Ponadto, powstaje kątowe ugięcie powierzchni cięcia, które negatywnie wpływa na powtarzalność geometryczną uzyskiwanych szczelin. Dlatego technologia cięcia laserowego jest najczęściej wykorzystywana do przygotowania formatek do spawania doczołowego.

Innym, istotnym ograniczeniem wykorzystania technologii spawania laserowego jest koszt zakupu urządzeń oraz dodatkowe koszty związane z wdrożeniem tej technologii w firmie produkcyjnej. W zależności od rozmiaru spawanych produktów, grubości blach oraz wymagań stawianym połączeniom spawanym, poniesione nakłady inwestycyjne wielokrotnie przewyższają koszty wynikające z wdrożenia innych technologii spawalniczych. Z kolei, koszty samego oprzyrządowania technologicznego wymaganego w przypadku spawania laserowego są porównywalne z kosztami oprzyrządowania wykorzystywanego w innych technologiach spawalniczych.

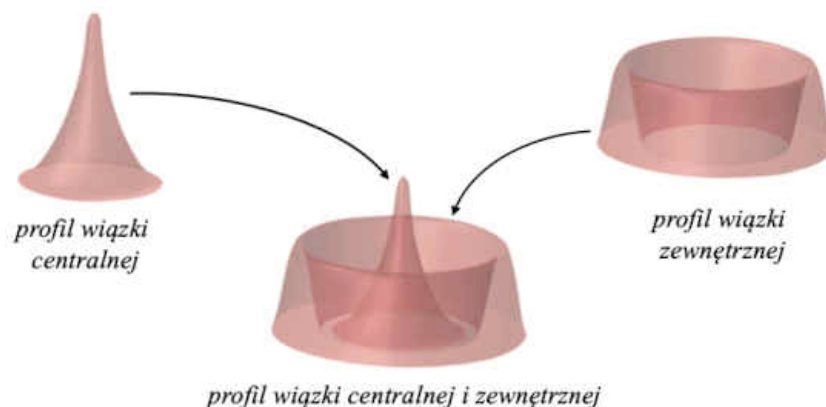
1.2.2. Metody spawania wiązką laserową

Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod spawania laserowego jest ***spawanie bez użycia dodatkowego materiału spoinowego***. Polega ono na przetapianiu brzegów spawanych blach wiązką promieniowania laserowego o dużej gęstości mocy w celu uzyskania połączenia spawanego. W zależności od gęstości energii można wyróżnić dwie techniki spawania laserowego, tj. z jeziorkiem lub z głębokim wtopieniem. Spawanie techniką z jeziorkiem charakteryzuje się dużą absorpcją energii w warstwie wierzchniej materiału, a kolejne warstwy nagrzewane są wskutek przewodnictwa cieplnego materiału. Technika ta wykorzystywana jest zazwyczaj do spawania materiałów o grubości do 2 mm, wiązką laserową o gęstości energii w zakresie $10^4 - 10^5 \text{ W/cm}^2$. Technika głębokiego wtopienia jest realizowana z gęstościami energii rzędu 10^6 W/cm^2 , wtedy w wyniku oddziaływania wiązki laserowej z powierzchnią

materiału dochodzi do częściowego odparowania materiału rodzimego i obniżania się – pod wpływem ciśnienia par – powierzchni przetopionego materiału. Prowadzi to w konsekwencji do utworzenia się tzw. kapilary przesuwającej się wzdłuż linii spawania. Średnica kapilary jest zazwyczaj zbliżona do średnicy plamki procesowej [62,64].

Spawanie z dodatkowym materiałem w postaci drutu spawalniczego jest wykorzystywane w sytuacjach, kiedy uzyskanie wymaganej szczeliny pomiędzy spawanymi blachami jest trudne lub niemożliwe. Dodatkowy materiał stosuje się również, gdy istnieje konieczność uzyskania wyższych właściwości mechanicznych spoiny, np. kiedy spawane są ze sobą dwa materiały o różnych właściwościach fizyko-mechanicznych oraz w przypadkach spawania wielowarstwowego blach grubych [65].

Kolejną metodą spawania laserowego jest *spawanie dwiema wiązkami laserowymi*. Metoda ta polega na wykorzystaniu w procesie spawania dwóch plamek procesowych. Proces ten realizowany jest za pomocą dwóch głowic procesowych lub jednej głowicy z regulowanym układem optycznym, do którego światłowodami doprowadzone są dwie wiązki laserowe. Ciekawym rozwiązaniem wydaje się być również wykorzystanie laserów włóknowych z regulowanym profilem wiązki. Rozwiązanie to umożliwia zogniskowanie wiązki zewnętrznej w kształcie pierścienia oraz drugiej wiązki centralnej klasycznie skupionej w postaci okrągłej plamki procesowej. Widok wiązki centralnej i zewnętrznej przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Regulowany profil wiązki stosowanej w laserach włóknowych typu AMB [66]

Zastosowanie dwóch plamek procesowych stosowane jest w aplikacjach spawania laserowego materiałów wrażliwych na wprowadzone ciepło. Jedna z wiązek laserowych jest wtedy wykorzystywana jako wiązka spawalnicza, druga zaś dzięki rozogniskowaniu może być użyta jako wiązka nagrzewająca materiał przed spawaniem lub jako wiązka wygrzewająca

złącze spawane po procesie spawania. Dzięki tej kombinacji oddziaływania wiązek laserowych można zmniejszać szybkość chłodzenia spoiny, a w konsekwencji kontrolować twardość poszczególnych stref złącza spawanego. Zastosowanie dwóch płamek spawalniczych ma też na celu zwiększenie jakości spawania poprzez zmniejszenie ilości porów w spoinie, ale także ma na celu zwiększenie wydajności procesu spawania lub poprawy jakości powierzchni przed spawaniem wiązką główną, np. poprzez odparowanie warstwy cynku z powierzchni blachy. Spawanie z dwiema plamkami pierwszy raz było wykorzystane w procesie spawania laserowego stalowych rur w celu zwiększenia wydajności procesu łączenia [62,67].

Spawanie hybrydowe to wykorzystanie dwóch źródeł ciepła w procesie łączenia materiałów w postaci wiązki laserowej oraz innej metody spawalniczej, np. wiązka laserowa + TIG, wiązka laserowa + MIG, wiązka laserowa + plazma. Technologie hybrydowe zazwyczaj wykorzystywane są do spawania blach grubych.

Spawanie w trybie pracy impulsowym PW (*ang. Pulse Wave*) lub **ciągłym** CW (*ang. Continous Wave*) ma wpływ na właściwości mechaniczne otrzymywanego złącza spawanego. Tryb pracy impulsowej najczęściej wykorzystywany jest do spawania materiałów o dużej refleksyjności oraz o dużej wrażliwości na wprowadzone ciepło. Przykładem takich materiałów mogą być konstrukcje, w których podzespoły elektroniczne zamykane są w stalowych, aluminiowych lub tytanowych obudowach, np. rozruszniki serca - zbyt duża ilość ciepła mogłaby zniszczyć elektroniczne elementy znajdujące się wewnątrz spawanej obudowy [57,68]. Tryb pracy ciągłej wykorzystywany jest również w aplikacjach, w których istotna jest szybkość procesu oraz podczas spawania materiałów wrażliwych na pękanie w strefie wpływu ciepła. Mniejsza szybkość chłodzenia pozwala zmniejszyć ryzyko powstawania pęknięć. Spawanie laserem w trybie ciągłym wykorzystywane jest również do spawania formatek TWB (*ang. Tailored Welded Blanks*) wykonanych ze stali o wysokiej wytrzymałości oraz do wstępnego podgrzewania materiału przed spawaniem lub do wygrzewania po spawaniu [62].

W przypadku spawania laserami działającymi w trybie pracy ciągłej CW do najistotniejszych parametrów procesu można zaliczyć: moc wiązki laserowej, prędkość spawania, pozycję spawania, mocowanie spawanych elementów oraz stosowanie gazu osłonowego. Moc źródła laserowego dobierana jest przede wszystkim na podstawie grubości spawanych blach. Wraz ze wzrostem prędkości spawania zmniejsza się szerokość oraz głębokość wtopienia. Większość pozycji spawania możliwych do zastosowania w innych

technologiach spawalniczych jest również dostępna dla spawania laserowego. Najczęstszą ze stosowanych pozycji jest pozycja płaska (1G). Gazy osłonowe podczas spawania laserowego wykorzystywane są w celu ograniczenia tworzenia się obłoku plazmy, ochrony jeziorka spawalniczego oraz ochrony elementów optycznych. Zazwyczaj podczas spawania laserowego wykorzystywany jest gaz osłonowy. W przypadku spawania laserem na ciele stałym preferowanym gazem jest argon, gdyż jest cięższy od powietrza i opada bezpośrednio na obrabiany przedmiot. W przypadku potrzeby spawania z bardzo dużymi prędkościami przemieszczania się wiązki laserowej, stosowanie gazów osłonowych staje się skomplikowane i mało efektywne. Przykładem takiego procesu może być technologia spawania laserowego z wykorzystaniem głowicy skanującej o dużej odległości ogniskowej, często przekraczającej 500 mm [62].

1.2.3. Urządzenia do spawania wiązką laserową

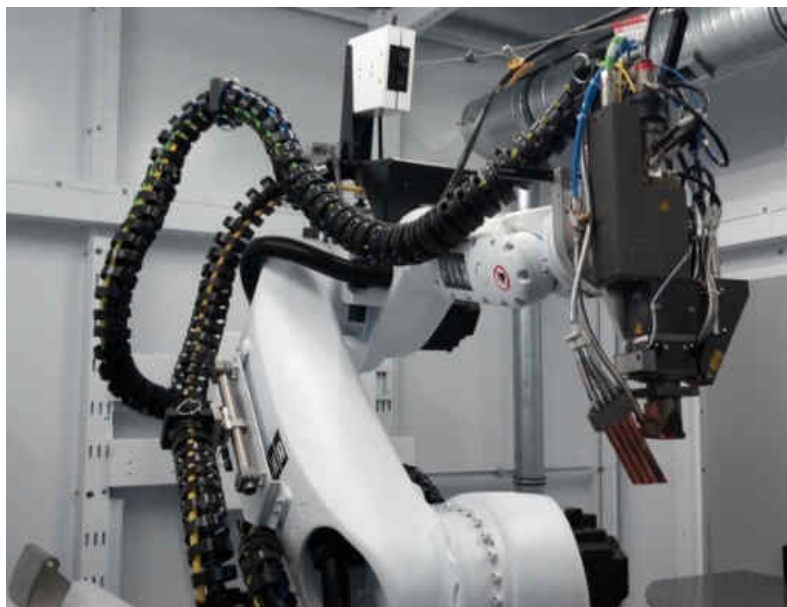
W zależności od wymagań stawianym spawanej konstrukcji stosowane są źródła laserowe o różnych charakterystykach. Do procesu spawania najczęściej wykorzystuje się lasery gazowe CO_2 oraz lasery na ciele stałym (dyskowe i włóknowe) [68]. W zależności od właściwości spawanych materiałów oraz wymagań stawianych złączom spawanym, w przemyśle wykorzystywane są lasery działające w trybie pracy impulsowej PW oraz lasery pracujące w trybie ciągłym CW.

Lasery CO_2 emitują długość fali $10,6\ \mu m$, dzięki temu możliwe jest spawanie podstawowych materiałów konstrukcyjnych takich, jak stal i aluminium. Wiązka laserowa dostarczana jest do głowicy procesowej za pomocą systemu luster, a następnie ogniskowana do rozmiaru rzędu dziesiątych części milimetra. Umożliwia to osiągnięcie gęstości energii na poziomie $10^6 - 10^7\ W/cm^2$. Lasery CO_2 wykorzystywane są często w systemach do spawania elementów płaskich (np. doczołowego spawania taśmy stalowej w kręgach lub w aplikacjach TWB) oraz w aplikacjach wymagających bardzo dobrej jakości wiązki promieniowania laserowego. Mogą pracować w trybie pracy ciągłej lub trybie impulsowym, a ich sprawność wynosi od 10 do 15%. Obecnie, lasery gazowe są rzadko stosowane do spawania wyrobów przestrzennych o skomplikowanych kształtach ze względu na trudności związane z precyzyjnym kontrolowaniem położenia wiązki laserowej za pomocą systemu luster.

Zgodnie z przeprowadzoną analizą stanu techniki laserów przemysłowych wykonaną w 2019 r. zawartą w pracy [69] najszybciej rozwijającą się grupą laserów spawalniczych są wysokiej mocy *lasery włóknowe* domieszkowane iterbem. Generują one wiązkę promieniowania o długości fali w zakresie $1,06\ \mu\text{m}$, dzięki temu możliwa jest transmisja wiązki laserowej z rezonatora do głowicy spawalniczej poprzez światłowód. W porównaniu do laserów CO_2 , lasery włóknowe mogą być stosowane z robotami przemysłowymi do budowy systemów spawalniczych. Dzięki integracji z robotami przemysłowymi czas potrzebny na uruchomienie produkcji seryjnej części spawanych laserowo został w znacznym stopniu skrócony [57,67]. Ponadto, sprawność energetyczna laserów włóknowych w porównaniu do laserów gazowych jest wyższa i może wynosić od 25 do nawet 50%. Lasery włóknowe mogą pracować w trybie pracy impulsowej oraz trybie pracy ciągłej [70]. Dodatkową zaletą laserów włóknowych jest ich modułowa i kompaktowa budowa, jest to istotna cecha biorąc pod uwagę koszty utrzymania powierzchni produkcyjnych. Obecnie, moce uzyskiwane przez przemysłowe lasery włóknowe produkowane seryjnie sięgają ponad 100 kW [66], rozszerza to zakres ich stosowalności do spawania grubych blach i pozwala na zwiększenie wydajności procesu spawania.

Lasery na ciele stałym typu *Nd:YAG* generują promieniowanie o długość fali wynoszącą $1,06\ \mu\text{m}$ i podobnie jak w przypadku laserów włóknowych wiązka z rezonatora do głowicy procesowej może być przesyłana za pomocą światłowodu. Lasery Nd:YAG pracujące w trybie impulsowym znalazły zastosowanie m.in. w produkcji litowo-jonowych baterii do samochodów elektrycznych.

W zależności od stopnia skomplikowania spawanej konstrukcji oraz stosowanego źródła laserowego stosowane są różne urządzenia do spawania laserowego. Najczęściej wykorzystywanymi układami kinematycznymi stosowanymi do manipulacji głowicą spawalniczą są systemy z wykorzystaniem 6-osioowych robotów przemysłowych, które są relatywnie tanie w stosunku do zintegrowanych maszyn do obróbki CNC. Ponadto, roboty przemysłowe są stosowane w firmach produkcyjnych od wielu dekad i ich integracja z innymi urządzeniami nie stanowi większego problemu. Roboty charakteryzują się dużą elastycznością i mogą być stosowane w produkcji krótko i wielkoseryjnej. Na rys. 10 przedstawiono przykład robota przemysłowego z zamontowaną głowicą do spawania laserowego.



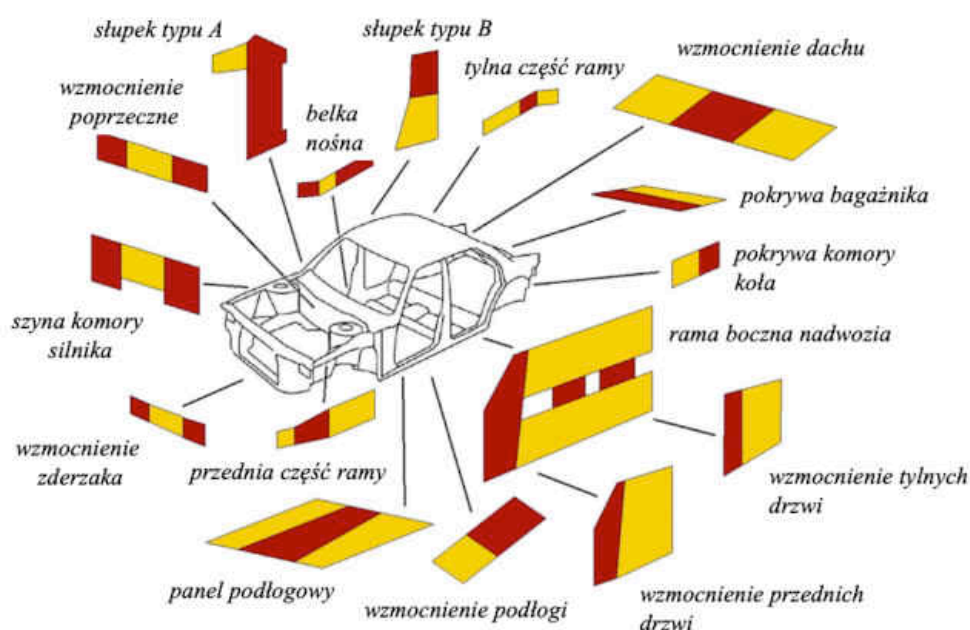
Rys. 10. Widok 6-osiowego robota przemysłowego z zainstalowaną głowicą spawalniczą z widocznymi dyszami doprowadzającymi gaz osłonowy w miejsce połączenia spawanego (fot. Paweł Prochenka, Ditzingen (Niemcy), siedziba firmy TRUMPF, 2015 r.)

1.2.4. Wykorzystanie technologii spawania wiązką laserową w przemysłowym łączeniu blach

Technologia spawania laserowego najczęściej wykorzystywana jest w procesie spawania podzespołów branży motoryzacyjnej. Dzięki takim zaletom jak np. prędkość spawania i ograniczona ilość ciepła wprowadzana do materiału, technika ta może stanowić alternatywę dla powszechnie stosowanej technologii zgrzewania oporowego lub ją uzupełniać [63]. Proces punktowego zgrzewania oporowego wymaga obustronnego dostępu do łączonych półfabrykatów, stosowane w tym procesie elektrody pod wpływem siły docisku do materiału oraz przepływu prądu o wysokim natężeniu ulegają zużyciu i wymagają regeneracji. Technologia spawania laserowego jest bezkontaktową metodą łączenia materiałów, która pozwala wyeliminować problem zużycia i regeneracji elektrod.

Wprowadzenie formatek spawanych laserowo TWB w produkcji podzespołów w branży transportowej umożliwiło optymalizację masy pojazdów. Produkcja TWB obejmuje m.in. doczołowe spawanie laserowe dwóch formatek o różnych grubościach i/lub wykonanych z różnych materiałów. Po przygotowaniu formatek poddawane są one następnie procesowi tłoczenia, podczas którego deformacji ulega nie tylko materiał rodzący formatki, ale także połączenie spawane. Dlatego oprócz wysokiej wytrzymałości mechanicznej wymaga się od

złącza spawanego także odpowiedniej ciągłości. Przykładowe produkty wykonywane w tej technologii przedstawiono na rys. 11. W literaturze tematycznej można znaleźć artykuły związane z badaniem TWB wykonanych ze stali typu DP [71–77]. Badania głównie dotyczą tłoczności TWB, oceny podstawowych parametrów wytrzymałościowych połączenia spawanego oraz oceny jakości uzyskanej mikrostruktury złącza. W pracach [78,79] dowiedziono, że zmniejszenie ciepła dostarczanego do materiału podczas spawania poprzez zwiększenie prędkości spawania oraz zmniejszenia średnicy płamki procesowej prowadzi w efekcie do zwiększenia tłoczności TWB.

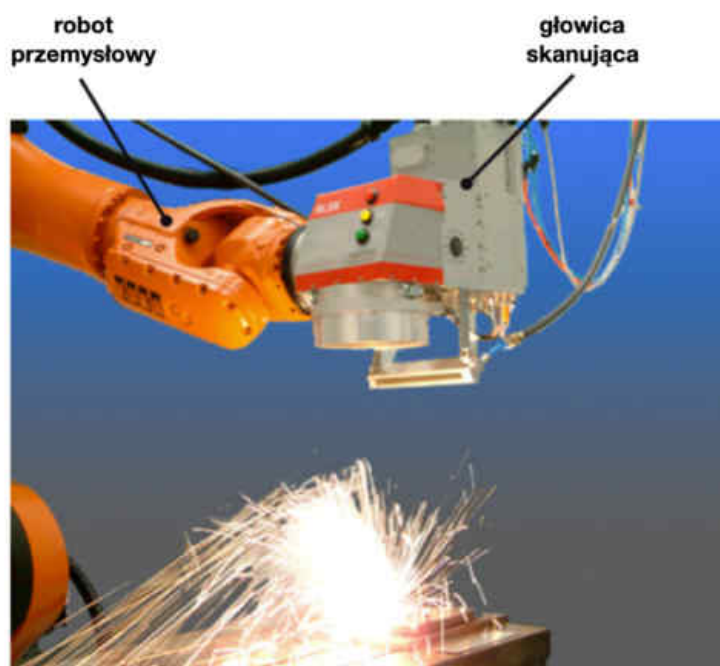


Rys. 11. Zastosowanie TWB w budowie struktury pojazdu drogowego [80]

Stosowanie cienkich blachy do budowy struktur pojazdów drogowych wymaga odpowiedniego zabezpieczenia antykorozyjnego. Producenci stali o zwiększonej wytrzymałości produkują stal z powłokami cynkowymi. Warstwa antykorozyjna stwarza trudności podczas spawania wiązką laserową. Najtrudniejszymi do wykonania połączeniami są połączenia zakładkowe. W pracy [81] autorzy dokonali oceny wpływu różnych parametrów procesu spawania laserowego na uzyskiwaną jakość połączeń zakładkowych. Najwyższą wytrzymałość złącza spawanego uzyskano dla niskich wartości mocy i prędkości spawania. Dodatkowo, autorzy wykorzystali proces wstępnego podgrzewania spawanego materiału za

pomocą rozogniskowanej wiązki laserowej. Zaproponowane rozwiązanie miało na celu zmniejszenie porowatości spoiny.

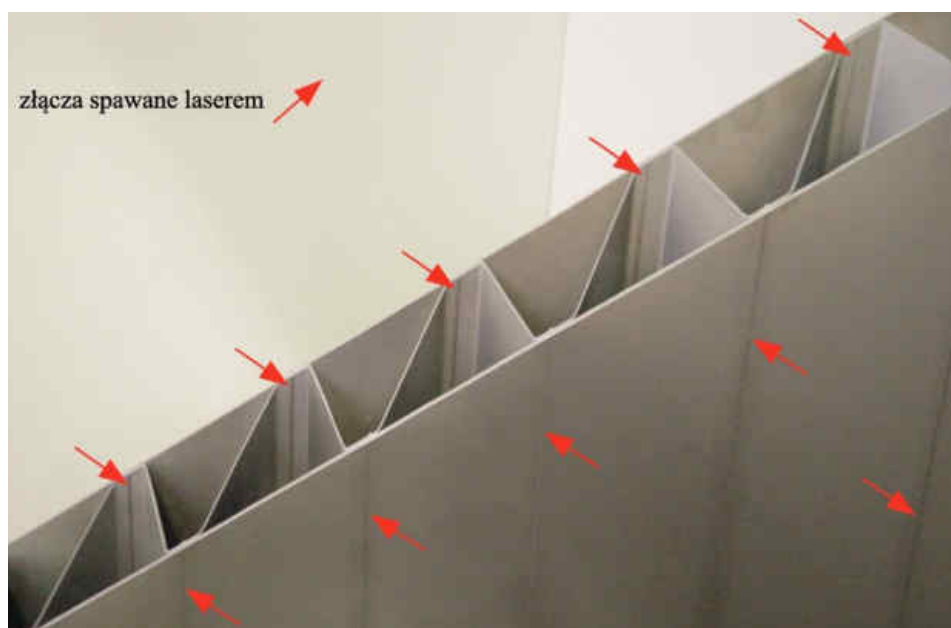
Technologią często wykorzystywaną w branży motoryzacyjnej jest spawanie z wykorzystaniem głowicy skanującej typu RLW (*ang. Remote Laser Welding*). Głowica procesowa porusza się nad spawanym detalem, najczęściej za pomocą sześćoosiowego robota przemysłowego (rys. 12). Ze względu na możliwość pracy w trzech wymiarach, podczas spawania 2D głowica procesowa może być montowana na robotach kartezyjskich. Dzięki własnym napędom głowicy, może ona realizować proces spawania przestrzennego o objętości ok. 200 x 300 x 200 mm (w przypadku głowicy HighYag) bez jej przemieszczania. Ponadto, konstrukcja głowicy umożliwia uzyskiwanie dużych prędkości ruchu wiązki laserowej, które mogą osiągać wartość rzędu 10 m/min [82]. W motoryzacji, jednym z przykładów zastosowania technologii RLW jest spawanie elementów drzwi samochodowych [62,83,84].



Rys. 12. Widok systemu spawania laserowego z wykorzystaniem głowicy skanującej [84]

Do budowy struktur pojazdów szynowych spawanie wiązką laserową najczęściej wykorzystuje się do spawania zewnętrznych paneli wykonanych ze stali nierdzewnej. Dawniej, były one wykonywane za pomocą technologii zgrzewania oporowego. Wadą tej technologii były widoczne z zewnątrz ślady po elektrodzie, które były niekorzystne wizualnie oraz nie zapewniały pełnej szczelności połączenia. Zmiana technologii zgrzewania punktowego na

liniowe spawanie laserowe umożliwiła produkcję paneli o wyższej jakości i pozwoliła na zwiększenie wydajności produkcji. Współcześnie technologia spawania laserowego wykorzystywana jest w produkcji podzespołów do szybkich pociągów w Danii, Włoszech oraz w pociągach działających na zasadzie lewitacji magnetycznej (Niemcy) [85]. Technologię spawania laserowego wykorzystuje się również do produkcji struktur podłogowych w pojazdach szynowych, które są wykonywane z cienkich blach stalowych, aluminiowych lub nierdzewnych, a następnie łączone liniową spoiną zakładkową od zewnętrznych stron konstrukcji. Takie podejście do projektowania umożliwia wytwarzanie konstrukcji o korzystnym stosunku masy do wytrzymałości. Na rys. 13 przedstawiono przykładową konstrukcję panelu wykorzystywanego do budowy struktur podłogowych w pojazdach szynowych.



Rys. 13. Cienkościenna konstrukcja spawana laserowo, wykorzystywana w pojazdach szynowych (fot. Paweł Prochenka, Targi Pojazdów Szynowych INNOTRANS, Berlin 2016 r.)

1.2.5. Metody oceny jakości połączeń spawanych laserowo

Niezgodności spawalnicze to termin opisujący wady występujące w spoinie, SWC oraz materiale rodzimym. Są one skutkiem niewłaściwego przygotowania półfabrykatów, użytych parametrów spawania, wpływu otoczenia spawalniczego oraz pozycjonowania wiązki laserowej względem spoiny. Część niezgodności można zidentyfikować na podstawie oceny

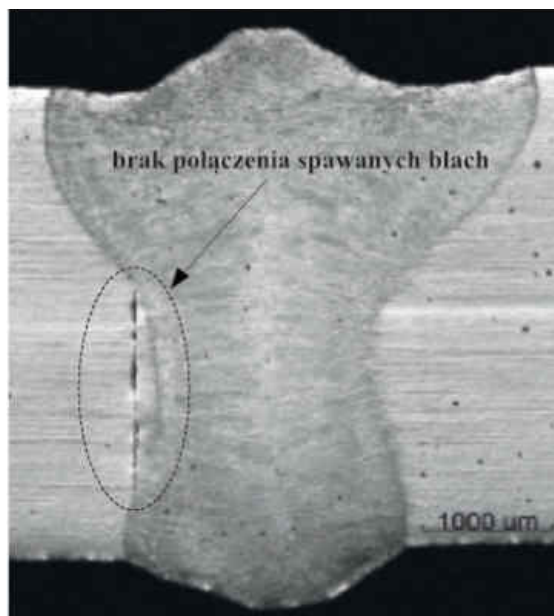
wizualnej profilu łoża i grani spoiny, jednak większość wad ukryta jest wewnątrz złącza spawanego i można je wykryć dzięki badaniom niszczącym. W normie PN-EN 13919-1:2020 opisano niezgodności złączy spawanych wiązką elektronów i promieniowania laserowego oraz przedstawiono wytyczne do określenia poziomów jakości złączy spawanych. Rozróżnia się trzy poziomy wymagań dotyczących jakości połączeń spawanych: D – wymagania łagodne, C – wymagania średnie, B – wymagania ostre. Poniżej scharakteryzowano wybrane, najczęściej stosowane metody nieniszczące i niszczące oceny połączeń spawanych.

Jedną z podstawowych metod jest **ocena wizualna (VT)**, polegająca na oglądzinach profilu łoża i grani złącza spawanego. Zazwyczaj jest przeprowadzana po procesie spawania, nieuzbrojonym okiem lub w powiększeniu nie przekraczającym 20x. Badania wizualne umożliwiają identyfikację podstawowych, zewnętrznych niezgodności spawalniczych. Tak jak każda inna metoda wymaga od osoby realizującej kontrolę odpowiedniego zasobu wiedzy oraz doświadczenia praktycznego. Metoda **magnetyczno-proszkowa (MT)** polega na wzbudzaniu pola magnetycznego w połączeniach spajanych i wykrywaniu miejsc rozproszenia pola magnetycznego, które zlokalizowane jest bezpośrednio nad miejscem występowania niezgodności spawalniczych. Metoda MT wykorzystywana jest do wykrywania wad powierzchniowych i podpowierzchniowych w materiałach ferromagnetycznych. Innymi metodami nieniszczącymi są **badania penetracyjne (PT)**, które służą do wykrywania przyklejeń, pęknięć powierzchniowych oraz pęcherzy wychodzących na powierzchnię materiału. Badania penetracyjne wykonuje się na ogół po ocenie wizualnej. Metoda **prądów wirowych (ET)** polega na wzbudzaniu prądów wirowych w badanym elemencie za pomocą wysokiej częstotliwości prądu przemiennego. Urządzenie analizujące sygnały pochodzące z przetwornika wiropiędowego nazywane jest defektoskopem wiropiędowym. Analizując rozkład pola natężenia prądów wirowych możliwa jest identyfikacja wad spawalniczych. Diagnostyka z wykorzystaniem metody **ultradźwiękowej (UT)** polega na zobrazowaniu sygnałów odbitych z wygenerowanych fal ultradźwiękowych. Do oceny jakości połączeń spawanych najczęściej stosuje się metodę impulsowej techniki echa oraz metodę TOFD (*ang. Time Of Flight Diffraction*), wykorzystującej zjawisko dyfrakcji fal ultradźwiękowych. Dzięki jednoznaczemu określeniu rodzaju nieciągłości spawalniczych oraz ich wymiarów badania ultradźwiękowe metodą TOFD często wykorzystywane są jako podstawowa technika oceny złączy spawanych na liniach produkcyjnych. Badania **radiologiczne (RT)** polegają na

prześwietlaniu materiału za pomocą promieniowania jonizującego z wykorzystaniem lampy rentgenowskiej. W przypadku badania złącz spawanych wykorzystuje się metody radiograficzne – polegające na utrwalaniu wyników badań na błonach fotochemicznych. Z kolei w przypadku metod radioskopowych, wyniki badań są wyświetlane na ekranie i mogą być zapisywane w formie cyfrowej co ułatwia ich późniejszą analizę. Rozszerzeniem badań radiologicznych jest **tomografia komputerowa (CT)**, która jest najszybciej rozwijająca się metodą badań nieniszczących. Polega ona na wykonaniu pojedynczych zdjęć obiektu wykonanych metodą radiologiczną, wykonanych z różnych kierunków, a następnie na ich podstawie utworzeniu cyfrowego modelu 3D złącza spawanego.

Jedną z podstawowych metod badań niszczących są **badania mikroskopowe** zglądów złącz spawanych. Próbkę do oceny jakości złącza wykonywane są poprzecznie do kierunku spawania, szlifowane, polerowane oraz trawione w celu odsłonięcia spoiny oraz SWC. Geometria spoiny jest mierzona w celu sklasyfikowania złącza do odpowiedniego poziomu wymagań jakościowych oraz identyfikacji wad spawalniczych tj. porowatość spoiny. Podczas badania oceniana jest również mikrostruktura poszczególnych stref złącza spawanego, najczęściej badana jest strefa przetopienia, gruboziarnista i drobnoziarnista strefa wpływu ciepła oraz właściwości materiału rodzimego. Ocena zglądów umożliwia również identyfikację istotnej wady jaką jest przesunięcie spoiny względem łączonych blach, problem ten często występuje w przypadku wykonywania połączeń doczołowych, wiązką laserową o małej średnicy, bez dodatkowego materiału, przykład takiej wady przedstawiono na rys. 14. **Pomiary twardości** wykonuje się z użyciem próbki wykonanej poprzecznie do kierunku spawania. Próbka powinna zawierać strefę przetopienia, strefy wpływu ciepła znajdujące się po obu stronach spoiny oraz materiał rodzimy. Do pomiaru twardości najczęściej wykorzystuje się metodę Vickersa, a siła nacisku wgłębnika dobierana jest w zależności od poziomu twardości spawanych materiałów. W celu wytrzymałościowej oceny złącz spawanych laserem najczęściej stosuje się **statyczną próbę rozciągania**, która pozwala na odniesienie wytrzymałości i ciągliwości złącza spawanego do materiału rodzimego. Badana próbka powinna zawierać wszystkie strefy złącza spawanego ze spoiną umiejscowioną symetrycznie względem szerokości próbki. Próbkę pobiera się za pomocą technologii ograniczającej wprowadzanie ciepła do materiału oraz zapewniające odpowiednią jakość ciętej powierzchni, np. obróbka elektroerozyjna. Badanie zazwyczaj wykonuje się w temperaturze pokojowej

jednak próbę rozciągania można prowadzić również w warunkach obniżonych lub podwyższonych temperatur [52,86].



Rys. 14. Widok doczołowego złącza spawanego laserem z zaznaczonym miejscem braku przetopienia [87]

1.3. METODY BADAŃ MATERIAŁÓW W ZAKRESIE DUŻYCH SZYBKOŚCI ODKSZTAŁCENIA

W rozdziale przedstawiono wybrane metody badań właściwości mechanicznych materiałów w warunkach deformacji plastycznej zachodzącej z dużymi szybkościami odkształcenia. Ze względu na charakter pracy, metodzie dzielonego pręta Hopkinsona poświęcono najwięcej uwagi, koncentrując się na problematyce wymagań metodycznych i technicznych wykonywania testów dynamicznych na rozciąganie próbek materiałowych pobieranych z blach.

1.3.1. Metody badań dynamicznych

Obecnie nie istnieje jedna, uniwersalna metoda badań właściwości mechanicznych materiałów, która umożliwiałaby wykonywanie testów wytrzymałościowych w szerokim zakresie szybkości odkształcenia obejmującym zarówno małe, średnie, duże, jak i bardzo duże zakresy szybkości odkształcenia. Ze względu na złożoność zjawisk fizycznych i różnorodność z tym związanych problemów technicznych, techniki badań wytrzymałościowych są obecnie

stosowane dla określonego zakresu szybkości odkształcenia i dla odpowiedniego charakteru obciążeń, w tab. 2 przedstawiono techniki badawcze stosowane w badaniach odpowiedzi mechanicznej materiałów w warunkach testu rozciągania [88].

Tab. 2. Zakresy szybkości odkształcenia oraz techniki badawcze stosowane do wyznaczenia właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w warunkach rozciągania

Zakres szybkości odkształcenia		Technika badawcza
Mała szybkość odkształcenia	$\dot{\epsilon} < 0,1 \text{ s}^{-1}$	Standardowe układy obciążenia
Średnia szybkość odkształcenia	$0,1 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 100 \text{ s}^{-1}$	Maszyny serwohydrauliczne, młoty spadowe, wahadłowe i rotacyjne
Duża szybkość odkształcenia	$100 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^3 \text{ s}^{-1}$	Dzielony pręt Hopkinsona na rozciąganie
	$10^3 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^4 \text{ s}^{-1}$	Test pierścieniowy
Bardzo duża szybkość odkształcenia	$\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ s}^{-1}$	Uderzeniowy test płytowy

Test pierścieniowy jest jedną z metod badań dynamicznych, która umożliwia badanie materiałów w warunkach jednoosiowego rozciągania w zakresie dużych szybkości odkształcenia. Istotą tej techniki jest nagła i krótkotrwała ekspansja promieniowa próbki materiałowej o geometrii cienkościennego pierścienia, podczas której jest rejestrowana zmiana promienia rozszerzającego się pierścienia lub zmiana prędkości radialnej. Na podstawie tych danych – dla etapu ekspansji swobodnej pierścienia, tj. dla tzw. ruchu inercyjnego – ruchu swobodnego wyznacza się naprężenia obwodowe (rozciągające) oraz odkształcenia. Najczęściej wykorzystywaną metodą napędzenia pierścienia jest metoda elektromagnetyczna. Główną cechą i zaletą metody ekspansji elektromagnetycznej jest brak wpływu zjawisk falowych na dynamiczną reakcję materiału pierścienia. Współcześnie, test pierścieniowy jest najczęściej wykorzystywany do oceny ciągliwości dynamicznej materiałów inżynierskich oraz do ich podatności do fragmentacji [88].

Uderzeniowy test płytowy jest metodą umożliwiającą badanie właściwości mechanicznych materiałów w najbardziej ekstremalnych warunkach obciążenia, podczas

których materiał badany odkształca się z bardzo dużymi szybkościami odkształcenia sięgających nawet poziomu 10^7 s^{-1} . Test płytowy polega na zderzeniu się ze sobą próbek w kształcie płyt lub krążków z bardzo dużą prędkością (nawet powyżej 1000 m/s), wywołując w materiale próbki przez bardzo krótki przedział czasu jednoosiowy stan odkształcenia wyniku zachodzących w materiale zjawisk falowych, w końcowym etapie obciążenia próbki. Do napędzenia próbek materiałowych wykorzystywane są układy wykorzystujących do napędzania energię eksplozji materiału wybuchowego, energię sprężonych gazów lub energię miotania elektromagnetycznego. Do głównych trudności związanych z realizacją eksperymentu płytowego należy zachowanie odpowiedniej równoległości pomiędzy powierzchniami płyt oraz problem pomiaru prędkości powierzchni swobodnej próbki krążkowej [88].

1.3.2. Metoda dzielonego pręta Hopkinsona

Z historycznego punktu widzenia, podstawowym badaniem realizowanym za pomocą techniki dzielonego pręta Hopkinsona jest dynamiczny test ściskania, którego podstawy teoretyczne opracował Herbert Kolski w 1949 r. [89]. Standardowy układ do badań techniką SHPB na ściskanie składa się z dwóch długich prętów, pręta transmitującego i pręta odbiorczego, pomiędzy którymi umieszczana się próbka walcowa. Fala wymuszająca (obciążenia) może być generowana na różne sposoby, najczęstsze to uderzenie cylindrycznego pocisku w pręt transmitujący lub wybuch miniaturowego ładunku wybuchowego. Fala wymuszająca dochodząc do czoła pręta od strony próbki cylindrycznej częściowo odbija się od niego przekształcając się w falę rozciągającą, pozostała część fali propaguje przez próbkę, w której ulega wielokrotnemu odbiciu. Pozostała część fali – nazywana falą odbiorczą – przechodzi do pręta transmitującego, gdzie jest rejestrowana za pomocą układu tensometrycznego, tak samo jak fala wymuszająca i odbita. Profil fali odbiorczej reprezentuje dynamiczną reakcję materiału [88].

Od momentu, kiedy stal produkowana jest w formie cienkich arkuszy, wielu badaczy zajęło się tematyką wykorzystania techniki dzielonego pręta Hopkinsona do badań dynamicznych na rozciąganie materiałów w postaci płaskich próbek. Do badań wykorzystywano różne modyfikacje stanowiska badawczego bazującego na idei i rozwiązaniu zaproponowanym przez Kolskiego. Na rys. 15 przedstawiono najpopularniejsze konfiguracje

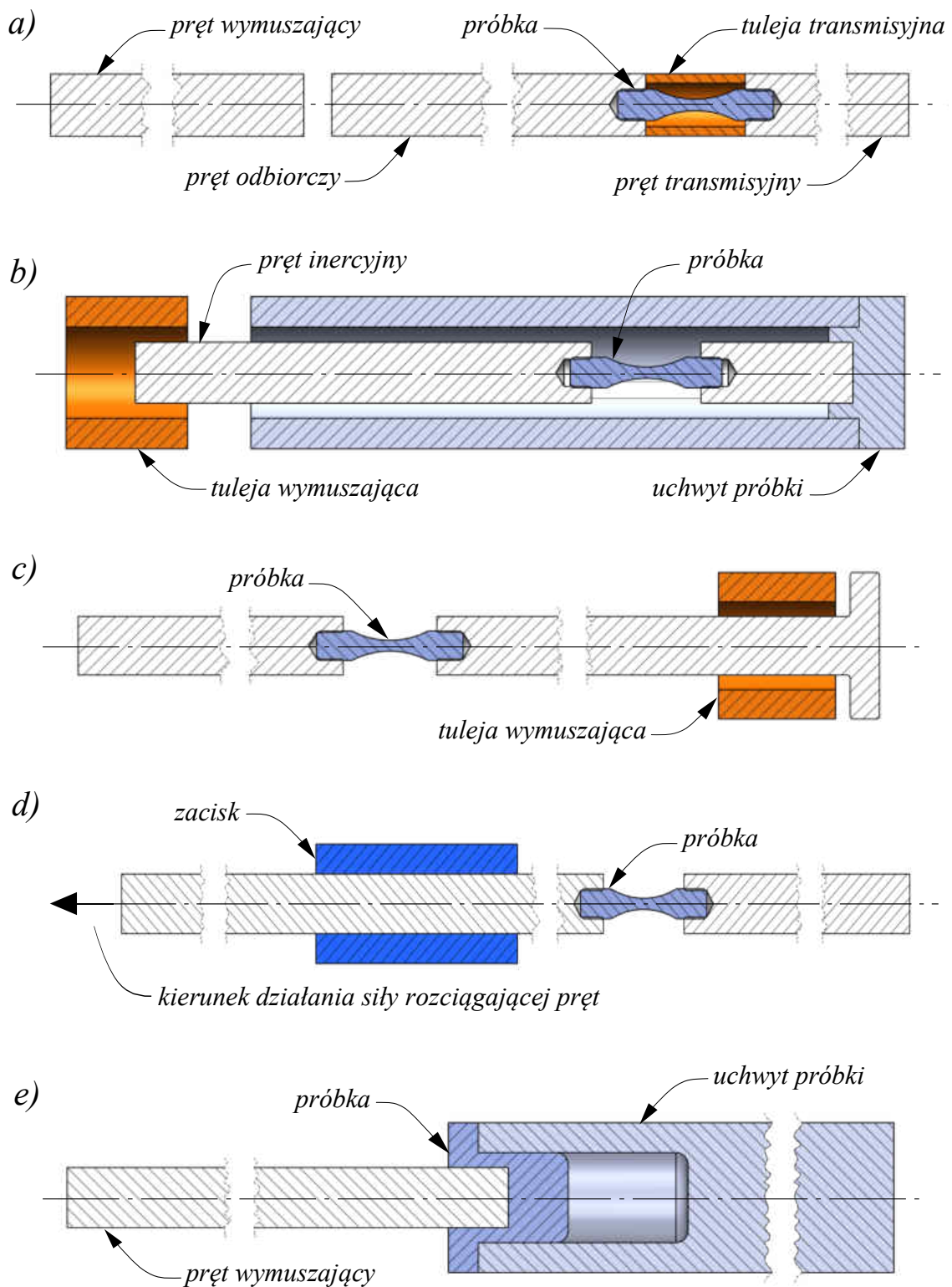
układów stosowanych do realizacji testów Hopkinsona na rozciąganie. Nicholas w pracy [90] zaproponował modyfikację stosowanego rozwiązania konstrukcyjnego poprzez dodanie dodatkowej tulei transmisyjnej pomiędzy prętem transmisyjnym i odbiorczym. Zaproponowany układ mocowania próbek pozwolił na realizację badań z zastosowaniem testu na rozciąganie (rys. 15a). Wygenerowana fala wymuszająca propaguje przez pręt odbiorczy, tuleję i próbkę do pręta transmitującego jako fala ściskająca. Przy tym kierunku propagacji fali wymuszającej próbka nie ulega deformacji, gdyż ogranicza ją sztywność tulei. Po odbiciu fali od końca pręta transmitującego fala propaguje już jako fala rozciągająca z powrotem w kierunku próbki skutkując jej rozciąganiem bez jakichkolwiek ograniczeń wynikających z zastosowania tulei. Główną zaletą tego rozwiązania jest możliwość badania materiałów na rozciąganie z wykorzystaniem stanowiska badawczego SHPB na ściskanie. Konwersja stanowiska do konfiguracji pozwalającej prowadzenie testów na rozciąganie wymaga jedynie niewielkich modyfikacji. Wadą scharakteryzowanego rozwiązania jest konieczność zapewnienia jak najwyższej dokładności połączeń pomiędzy próbką i prętami oraz tuleją i prętami. Zabieg ten ma na celu minimalizację luzów będących źródłem zaburzeń propagujących się fal naprężenia.

Inne rozwiązanie techniczne charakteryzowanego układu zaproponowano w pracy [91]. Przedstawiono w niej wariant konstrukcyjny wykorzystujący tzw. pręt inercyjny (rys. 15b). Wygenerowanie naprężenia rozciągającego następuje wskutek uderzenia tulei wymuszającej w tuleję transmitującą, a wygenerowany impuls siły następnie powoduje rozciągnięcie próbki po odbiciu się fali od jednego z końców tulei. Próbkę jest montowana pomiędzy uchwyt próbki, a pręt inercyjny, który dzięki swojej bezwładności nie przemieszcza się w trakcie rozciągania próbki, ponadto pełni on również funkcję pręta odbiorczego.

Innym powszechnie stosowanym układem badawczym do testów rozciągania jest konstrukcja przedstawiona na (rys. 15c). Taka konfiguracja stanowiska została zaproponowana przez Ogawa w pracy [92]. Impuls siły generowany jest poprzez uderzenie tulei wymuszającej w kołnierz pręta transmitującego. Wygenerowana w ten sposób sprężysta fala rozciągająca powoduje plastyczne odkształcenie próbki, która jest zamocowana pomiędzy prętami. Sposób mocowania próbki pomiędzy prętami jest stosunkowo prosty w stosunku do innych dotychczas przedstawianych rozwiązań, jednak wymaga on dodatkowego, dość złożonego rozwiązania niezbędnego do napędzenia tulei wymuszającej [88].

Inną konfiguracją układu SHPB do rozciągających badań dynamicznych jest rozwiązanie z tzw. zaciskiem. Przykładowy schemat takiego układu przedstawiono na rys. 15d. Za pomocą mechanizmu napinającego odkształcany jest sprężyste pręt transmitujący na odcinku od końca pręta do zacisku. Po jego zwolnieniu, energia odkształcenia sprężystego zmagazynowana w pręcie wykorzystywana jest do rozciągnięcia próbki materiałowej umieszczonej pomiędzy dwoma prętami. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wygenerowania fali wymuszającej o długości większej niż wcześniej opisywane układy badawcze.

Z kolei, Lindhol i Yeakly w pracy [93] zaproponowali wykorzystanie próbki kapeluszowej umieszczanej pomiędzy prętem wymuszającym, a prętem transmitującym, wykonanym w postaci rury (rys. 15e). Ściskająca fala sprężysta generowana w pręcie wymuszającym wywołuje powstanie fali plastycznej w materiale próbki kapeluszowej. Zaletą tego rozwiązania jest stosunkowo prosta konfiguracja stanowiska, wadą zaś, trudności związane z wykonaniem próbki materiałowej oraz ograniczenia wynikające z braku możliwości wykonania próbki z półfabrykatu w postaci blachy.



Rys. 15. Schematy przykładów rozwiązań konstrukcyjnych układów badawczych do badań dynamicznych na rozciąganie [88,94]

1.3.3. Problematyka prowadzenia badań dynamicznych z użyciem próbek płaskich

Efekty falowe występujące podczas badań dynamicznych mają znaczący wpływ na otrzymane wyniki, zwłaszcza powyżej szybkości odkształcenia ($10^2 s^{-1}$). Propagacja fal naprężenia w próbce materiałowej zależy w dużym stopniu od geometrii i materiału próbki, a także od stanu naprężenia (np. stan jednoosiowego ściskania i rozciągania) [88].

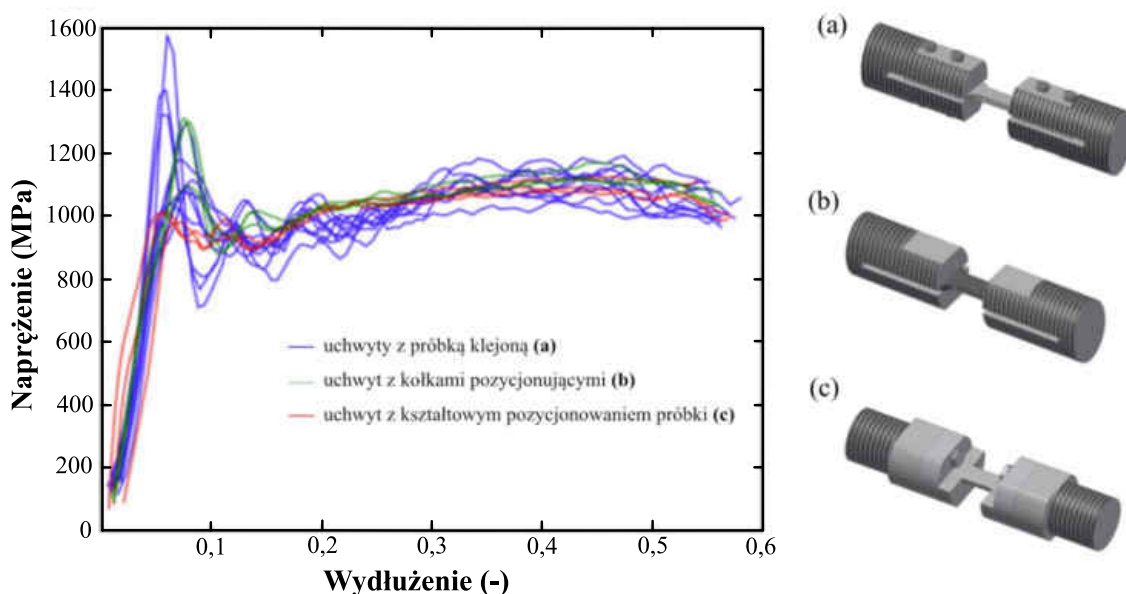
Geometria próbki materiałowej mogą wywoływać niepożądane efekty bezwładnościowe. W celu ich zminimalizowania dąży się do zmniejszania geometrii próbki, tj. stosowania próbek o mniejszej długości pomiarowej. Sprzyja to osiągnięciu wyższych szybkości odkształcenia, przy czym zbyt mała długość pomiarowa próbki może powodować zaburzenia w przebiegu procesu rozciągania [95].

Mocowanie próbki materiałowej w teście Hopkinsona na rozciąganie jest zdecydowanie trudniejsze w porównaniu do testu na ściskanie. Badanie płaskich próbek materiałowych w postaci blach wymaga odpowiedniego sposobu mocowania do prętów, a sam system mocowania jest kluczowy w celu osiągnięcia zadowalającej jakości rejestrowanych sygnałów odwzorowujących przebieg fal w prętach [96]. Kang i inni w pracy [97] sformułowali ogólne założenia konstrukcyjne dla prawidłowo zaprojektowanych uchwytów do badań próbek płaskich w teście Hopkinsona na rozciąganie. Zgodnie z zaleceniami ww. autorów, po pierwsze, średnica uchwytów powinna być zbliżona do średnicy prętów SHPB, dzięki temu impedancja mechaniczna uchwytów zbliżona jest do impedancji prętów. Po drugie, siła mocowania próbki musi być na tyle duża, aby uniemożliwić próbce możliwość przesuwania się podczas trwania testu. Powyższe ogólne założenia zostały uszczegółowione na podstawie „Recommendations for Dynamic Tensile Testing of Sheet Steels” [98] i przedstawiają się następująco:

- uchwyty mocujące próbkę powinny być precyzyjnie wykonane w celu uniknięcia powstawania momentów gnących oddziałujących na próbkę;
- części uchwytowe powinny być przytwierdzone bezpośrednio do prętów oraz powinny być wykonane z tego samego materiału co pręty;
- uchwyty powinny charakteryzować się jak najwyższym wskaźnikiem sztywności do masy.

Z kolei, w pracy [99] autorzy przetestowali trzy typy mocowań próbki materiałowej: uchwyty z próbką klejoną, z otworami pozycjonującymi oraz z próbką unieruchomioną poprzez

zastosowanie połączenia kształtowego (rys. 16). Dla próbek klejonych oraz z mocowaniem za pomocą kołków pozycjonujących zauważono znacznie większe oscylacje odpowiedzi dynamicznej materiału w stosunku do próbki ograniczonej geometrycznie za pomocą odpowiedniego kształtu uchwytów.



Rys. 16. Porównanie przebiegów dynamicznych uzyskanych dla materiału próbek mocowanych dla trzech typów uchwytów [99]

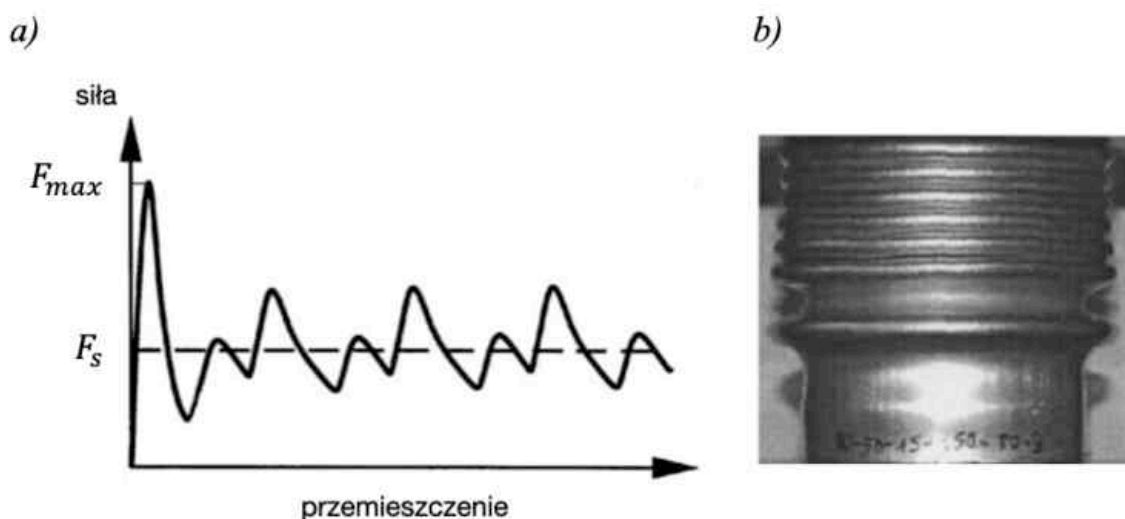
1.4. ENERGOCHŁONNOŚĆ MECHANICZNA CIENKOŚCIENNYCH ABSORBERÓW KOLUMNOWYCH

Energochłonność mechaniczna definiowana jest jako zdolność materiału do pochłaniania energii uderzenia. Zdolność ta wynika z mechanizmów powstających w trakcie procesu deformacji i niszczenia danego materiału/struktury i określana jest m.in. przez takie parametry mechaniczne materiału, jak wytrzymałość i ciągliwość. Zapewnienie odpowiedniego poziomu energochłonności jest jednym z najważniejszych etapów projektowania pojazdów drogowych [9]. W cienkościennych, stalowych absorberach, energia uderzenia zamieniana jest głównie na pracę plastycznego odkształcenia materiału. Na rys. 17 przedstawiono kolumnowe absorbery energii mechanicznej stosowane w pojeździe szynowym będące efektem zderzenia z przeszkodą.



Rys. 17. Widok absorberów energii mechanicznej stosowanych w pojeździe szynowym po zderzeniu z przeszkodą (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2017 r.)

Ocena efektywności energochłonnych, pasywnych absorberów energii mechanicznej prowadzona jest głównie na podstawie analizy przebiegu krzywej - siły zgniatania w funkcji przemieszczenia rejestrowanej w trakcie procesu zgniatania absorbera. Przykładową charakterystykę oraz widok częściowo odkształconego plastycznie absorbera o przekroju cylindrycznym przedstawiono na rys. 18.



Rys. 18. Przykładowa charakterystyka zgniatania cienkościennego absorbera energii mechanicznej a) oraz widok częściowo odkształconego cylindrycznego absorbera energii b) [100]

W literaturze istnieje wiele parametrów pozwalających na ocenę efektu procesu zgniatania cienkościennych, kolumnowych absorberów energii mechanicznej. Do najważniejszych zaliczyć można [101]:

- **Energia absorpcji E_p [J]** obliczana jest z zależności (1), gdzie $F(x)$ oznacza krzywą siły zgniatania, zaś d oznacza skrócenie (drogę zgniatania) absorbera. Graficznie energię absorpcji (pochlania) wyraża pole powierzchni pod krzywą siła-skrócenie w zakresie od 0 do skrócenia końcowego d_{max} .

$$E_p(d) = \int_0^d F(x) dx \quad (1)$$

- **Siła zniszczenia F_{max} [N]** to maksymalna siła występująca podczas procesu zgniatania absorbera. Występuje ona zazwyczaj na początku etapu zgniatania absorbera mechanicznego.
- **Średnia siła zgniatania F_s [N]** jest to stosunek energii do wielkości skrócenia.

$$F_s(d) = \frac{E_p(d)}{d} \quad (2)$$

- **Współczynnik efektywności siły zgniatającej CFE [-]** (*ang. Crash Force Efficiency*) jest miarą stabilności procesu zgniatania. Im mniejsza jest różnica pomiędzy wartością siły zniszczenia i średnią siłą zgniatania tym konstrukcja absorbera jest korzystniejsza pod kątem jej energochłonności [102]. Idealny absorber energii cechuje wartość parametru $CFE = 1$.

$$CFE = \frac{F_s(d)}{F_{max}} \quad (3)$$

- **Energia właściwa $E_w(d)$** jest parametrem umożliwiającym porównywanie energochłonności struktur wykonywanych z materiałów o różnych parametrach fizyko-mechanicznych. Jest to stosunek zaabsorbowanej energii do masy absorbera (m_a).

$$E_w(d) = \frac{E_p(d)}{m_a} \quad (4)$$

1.4.1. Struktury energochłonne

Wraz ze wzrostem wymagań dotyczących poprawy bezpieczeństwa i zmniejszania masy pojazdów drogowych, wzrosło zapotrzebowanie na wykorzystanie stali o wysokiej wytrzymałości w masowej produkcji kolumnowych absorberów energii. W literaturze można znaleźć wiele prac poświęconych tematyce zastosowania różnorodnych geometrii poprzecznych absorberów, takich jak: sześciokątnych [103], jednoomowego trapezu [102,104,105], lub prostokąta [106,107], dwuomowego prostokąta [108], kwadratu [109], okręgu [39] oraz dwunastokąta [110]. Wiele prac dotyczy również badań konstrukcji o strukturze plastra miodu [111,112].

Dobór technologii łączenia podzespołów absorbera ma istotne znaczenie w kontekście prawidłowego procesu zgniatania. Powstające pęknięcia w połączeniach, zwłaszcza w początkowej fazie zgniatania, mogą doprowadzić do ograniczenia lub całkowitej utraty stabilności procesu zgniatania struktury energochłonnej. W zależności od geometrii absorbera stosowane są różne produkcyjne technologie łączenia. Ze względu na wieloletnie stosowanie w przemyśle, technologia punktowego zgrzewania oporowego jest jedną z najczęściej stosowanych technik łączenia elementów składowych kolumnowych absorberów energii mechanicznej [102,106,108,113]. Do technologii łączenia blach, które także często są stosowane należy: spawanie metodą MAG [114], klinczowanie [13] oraz coraz częściej stosowana technologia spawania laserowego [103,109,115].

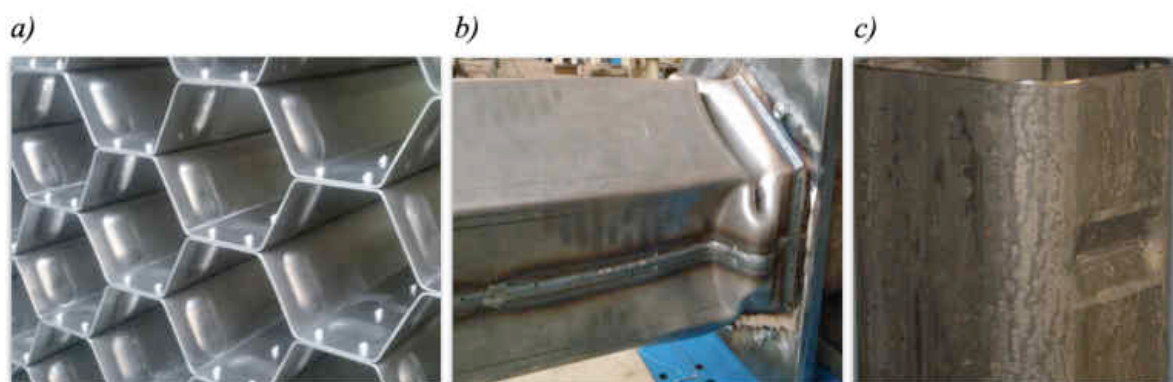
Ważnym elementem kolumnowych cienkościennych absorberów energii mechanicznej są tzw. inicjatory zgniotu. Są to najczęściej miejscowe wgniecenia w bocznych ściankach absorbera, lokalnie osłabiające jego sztywność, dzięki temu proces zgniatania struktury zachodzi w sposób „zaprogramowany”. Brak inicjatorów zgniotu może powodować globalne wyboczenie konstrukcji absorbera, jak pokazano to na rys. 19 [116]. Ponadto, zastosowanie inicjatorów ma na celu zmniejszenie wartości siły zgniatania występującej na początku procesu deformacji absorbera. W literaturze opisano różne typy inicjatorów zgniatania, przykładem mogą być inicjatory wykonywane poprzez plastyczne odkształcenie materiału – wgniecenie [39,104], wykonanie otworów na bocznych ściankach profilu [117] lub zmianę struktury materiału za pomocą np. rozogniskowanej wiązki laserowej. Na rys. 20 przedstawiono przykłady absorberów z inicjatorami zgniotu w postaci miejscowego plastycznego odkształcenia materiału (wgniecenia). Oprócz wyżej opisanych typów inicjatorów można

jeszcze wyróżnić inicjatory powstałe w wyniku miejscowego zwiększenia sztywności poprzez stałe umieszczenie blach wewnątrz konstrukcji absorbera w odpowiednich odstępach pomiędzy sobą. Przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rys. 21, jest to absorber wykorzystywany w pociągach Pendolino ED250, które również poruszają się po polskich torach z prędkością maksymalną do 200 km/h.

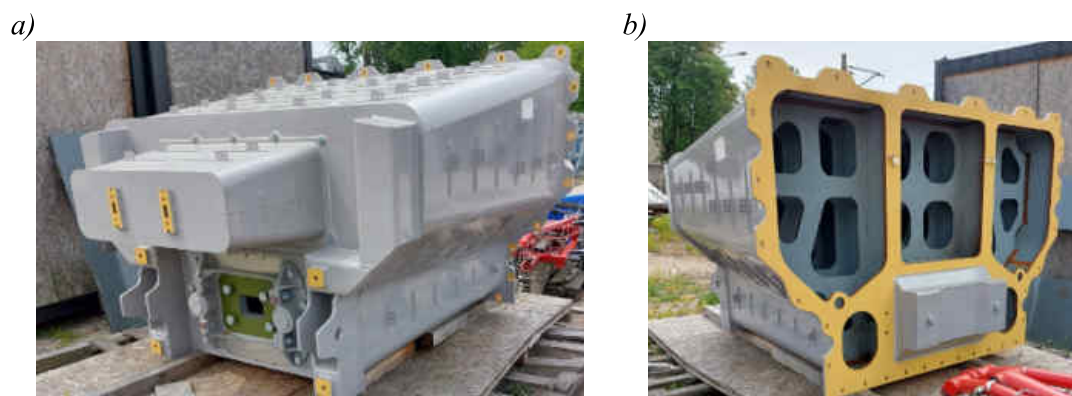
Kolumnowe absorbery energii mechanicznej mogą być otwarte lub zamknięte doczołowo blachami, jednak najczęściej spotykane są konstrukcje zamknięte, ze względów uproszczenia ich montażu do konstrukcji pojazdu [104]. Omawiając struktury energochłonne należy również zwrócić uwagę na konstrukcje kompozytowe, które ze względu na niską masę można również spotkać w elektrycznych pojazdach drogowych i szynowych (rys. 22).



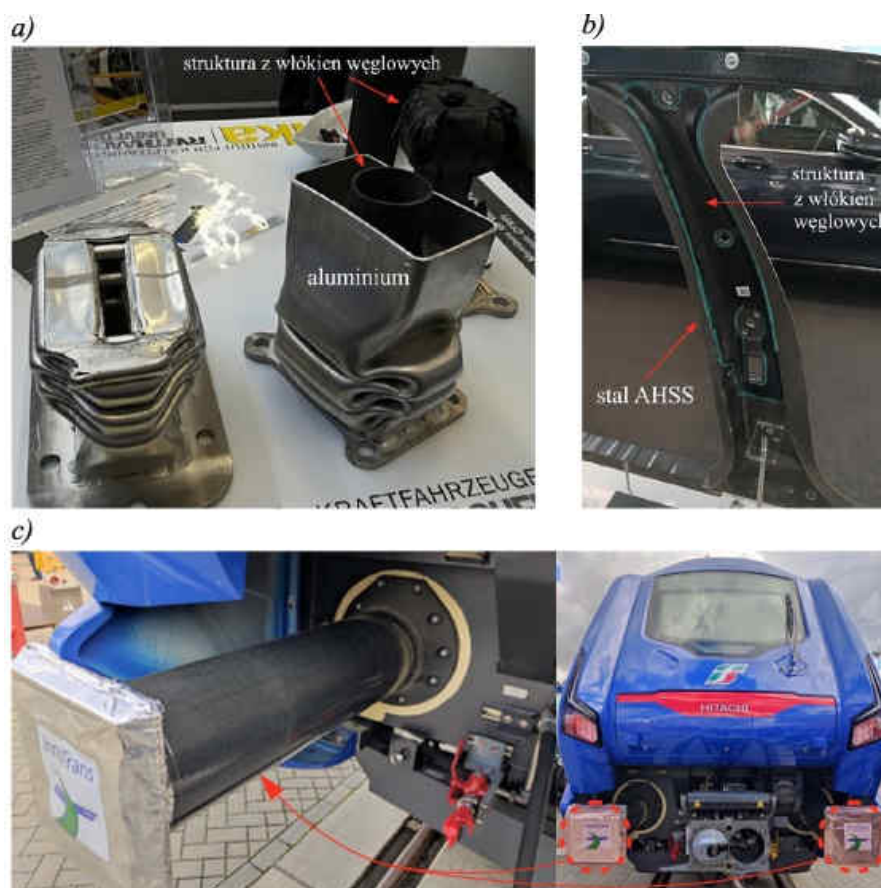
Rys. 19. Globalne wyboczenie absorberów bez inicjatorów zgniotu, strzałkami zaznaczono miejsca niesymetrycznego składania się konstrukcji [116]



Rys. 20. Przykłady wybranych inicjatorów zgniotu wykonywanych poprzez obróbkę plastyczną: a) absorber aluminiowy o przekroju plastra miodu (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2015r.); b) stalowy absorber wykorzystywany w pociągach kolejowych ze wstępnie zdeformowaną częścią czołową (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2016r.); c) stalowy absorber z inicjatorem zgniotu wykonanym w technologii kształtowania za pomocą cieczy, tzw. hydroformowanie [39]



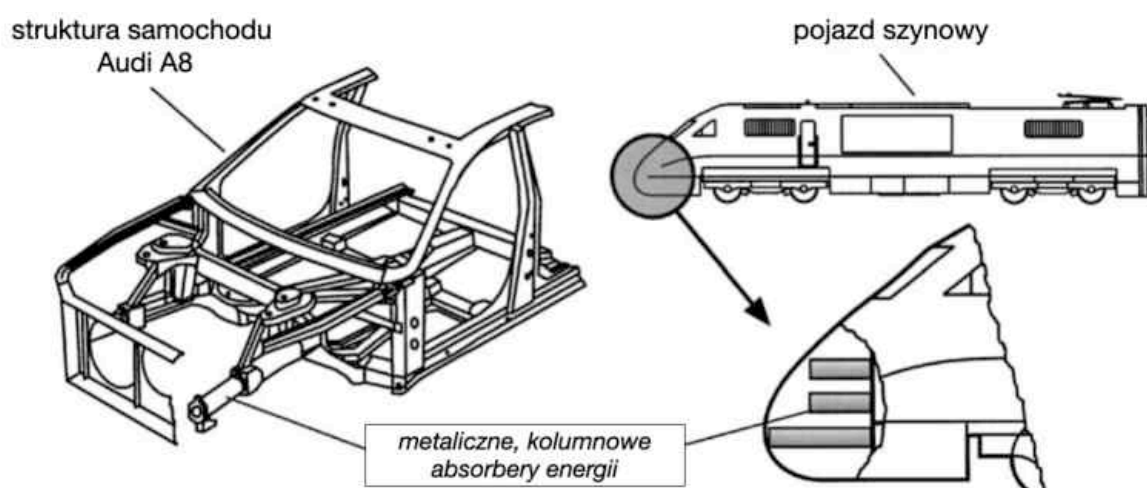
Rys. 21 Widoki absorbera energii mechanicznej stosowanego w pociągach Pendolino ED250: a) widok z przodu oraz b) widok od strony mocowania do pociągu z widocznymi inicjatorami zgniotu w postaci wewnętrznych przegród (fot. Paweł Prochenka, Warszawa 2022 r.)



Rys. 22. Widok absorberów energii mechanicznej wykonanych z aluminium z dodatkową strukturą z włókien węglowych a) (fot. Paweł Prochenka, Targi Materiałów Kompozytów COMPOSITE EUROPE, Dusseldorf 2016 r.), słupek boczny wykonany ze stali AHSS z przyklejonym elementem z włókien węglowych b) (fot. Paweł Prochenka, Targi Materiałów Kompozytów COMPOSITE EUROPE, Dusseldorf 2016 r.) oraz absorber kolumnowy wykonany z elementów aluminiowych i włókna węglowego wykorzystywany w lokomotywie hybrydowej Hitachi c) (fot. Paweł Prochenka, Targi Kolejowe INNOTRANS, Berlin 2022 r.)

1.4.2. Zastosowanie struktur energochłonnych

Kolumnowe, pasywne absorbery energii mechanicznej są powszechnie stosowanymi konstrukcjami, które posiadają zdolność do pochłaniania energii mechanicznej podczas zderzenia w sposób kontrolowany. Przykładami pojazdów, w których wykorzystywane są metaliczne absorbery energii mechanicznej są pojazdy drogowe oraz pojazdy szynowe. Absorbery są stosowane przede wszystkim, aby chronić pasażerów przed skutkami dużych przeciążeń występujących podczas kolizji lub zderzenia oraz aby ograniczyć uszkodzenia konstrukcji pojazdu. Na rys. 23 przedstawiono miejsca mocowania pasywnych absorberów kolumnowych w pojazdach drogowych i szynowych [100], zaś na rys. 24 przedstawiono widok kolejowych absorberów energii produkowanych w przedsiębiorstwie BOZAMET Sp. z o. o. w Siedlcach.



Rys. 23. Miejsca mocowania kolumnowych struktur energochłonnych w pojazdach drogowych i szynowych [100]

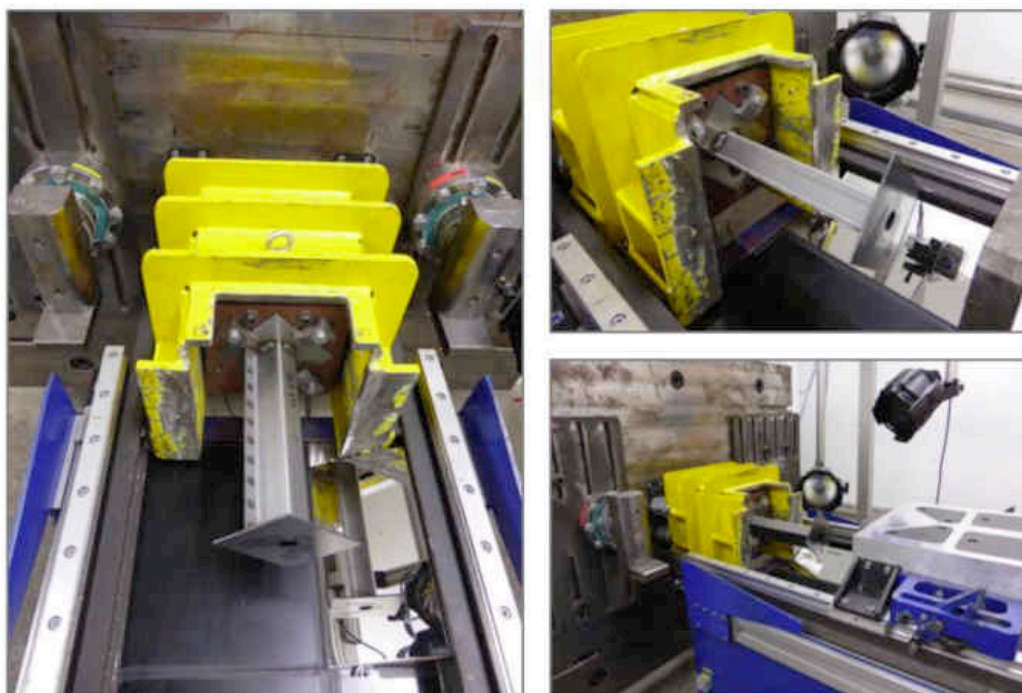


Rys. 24. Widok absorberów energii mechanicznej stosowanych w pojazdach szynowych (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2016 r.)

1.4.3. Metody badań wytrzymałościowych struktur energochłonnych

Podczas zderzeń pojazdów drogowych z prędkością $60\div 80$ km/h, wartości szybkości odkształcenia materiału mogą przekraczać poziom szybkości odkształcenia 10^3 s^{-1} . Stąd, oprócz badań struktur energochłonnych w warunkach quasi-statycznego obciążenia są wykonywane testy absorberów kolumnowych obciążanych dynamicznie (udarowo) [45]. Zderzenia czołowe są najczęstszą przyczyną powstawania poważnych urazów ciała oraz śmierci uczestników wypadków drogowych, dlatego w literaturze zdecydowana większość publikacji dotyczy badań eksperymentalnych jak i numerycznych oceny energochłonności absorberów energii mechanicznej prowadzonych w warunkach osiowego zgniatania.

Quasi-statyczne testy zgniatania absorberów są głównie wykonywane z użyciem standardowych maszyn wytrzymałościowych wyposażonych w systemy rejestracji siły i przemieszczenia. Badania zazwyczaj wykonywane są z szybkością przesuwu trawersy wynoszącą $0,1\text{ mm/s}$ [107]. W zależności od wymagań stawianym pasywnym, kolumnowym absorberom, badania dynamiczne przeprowadzane są najczęściej z wykorzystaniem młotów spadowych lub specjalistycznych poziomych maszyn wytrzymałościowych. Badania z wykorzystaniem młotów spadowych najczęściej realizowane są z prędkościami uderzenia z zakresu od 6 do 10 m/s , a masa bijaka używana podczas testów wynosi od 220 do 300 kg [13,103,113,117]. Urządzenia specjalistyczne umożliwiają badania ze zbliżonymi, a nawet większymi prędkościami uderzenia przy jednocześnie większej masie bijaka. W pracy [39] wykorzystano bijak o masie 1145 kg , który rozpędzono do 8 m/s . Innym, interesującym przykładem realizacji badań dynamicznych cienkościennych absorberów energii mechanicznej jest praca [104]. Autorzy do testów wykorzystali poziomą maszynę wytrzymałościową przedstawioną na rys. 25. Przewagą tego typu urządzeń badawczych w stosunku do młotów spadowych jest możliwość badania konstrukcji energochłonnych o większych rozmiarach, co może być istotne w przypadku pełnowymiarowych absorberów stosowanych np. w pojazdach szynowych. Z kolei w pracy [118] zaproponowano wykorzystanie układu SHPB o dużej średnicy prętów do bezpośredniego uderzenia w miniaturowy absorber energii mechanicznej.



Rys. 25. Widoki przykładowego stanowiska do osiowego zgniatania absorberów mechanicznych z bijakiem o masie 283 kg [104]

1.4.4. Ocena energochłonności absorberów kolumnowych wykonanych ze stali o wysokiej wytrzymałości

Wiele prac w literaturze z zakresu badań dynamicznych absorberów mechanicznych wykonanych ze stali o wysokiej wytrzymałości skupia się na konstrukcjach wykonanych ze stali typu DP oraz TRIP [119]. W pracy [33] wykazano przewagę stali TRIP nad DP (o porównywalnej wytrzymałości) w zakresie ilości zaabsorbowanej energii dla niskich i dużych szybkości odkształcenia. Analizując w sposób szczegółowy efektywność obydwu rozwiązań można zauważyć, że absorbery wykonane ze stali DP pochłonęły więcej energii we wczesnej fazie deformacji, co jest szczególnie istotne z uwagi na konieczność zapewnienia wysokiej skuteczności absorpcji energii mechanicznej przy najwyższych poziomach szybkości odkształcenia. Z drugiej strony w pracy [106] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych osiowego zgniatania absorberów wykonanych ze stali TRIP 800. Na ich podstawie stwierdzono, że niski udział struktury martenzytycznej po deformacji z wysokimi szybkościami odkształcenia ogranicza zdolność do energochłonności stali TRIP 800 w przypadku odkształcenia osiowego. Cecha ta, wskazuje na potrzebę dalszego rozwoju innych gatunków stali z rodziny AHSS, na przykład stali typu DP. Abedrabbo i inni [39] porównywali

energochłonność absorberów kolumnowych wykonanych ze stali HSLA 350 oraz DP (DP600 i DP780). Porównywano absorbery o przekroju kołowym oraz prostokątnym – powstałym w wyniku hydroformowania rury o przekroju kołowym. W prowadzonych testach zwrócono uwagę na wpływ pocienienia blachy w narożach absorbera o przekroju kwadratowym oraz w miejscu inicjatora zgniotu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wartość średniej siły zniszczenia była niższa o ok. 50% dla absorberów hydroformowanych. W pracy [115] autorzy porównali parametry zgniatania w warunkach quasi-statycznego i dynamicznego obciążenia absorberów o przekroju kapeluszowym - zgrzewanych punktowo oraz absorberów o przekroju kwadratowym - spawanych laserowo. Obydwa typy absorberów były wykonane ze stali DP 800. Jednoośmiegowa konstrukcja zgrzewana punktowo charakteryzowała się wyższą o ok. 16 % siłą zniszczenia w stosunku do absorberów o przekroju kwadratowym, jednak konstrukcje spawane laserowo cechowały się wyższym o ok. 17% poziomem energii pochłaniania. W artykule [118] porównano parametry energochłonności absorberów o przekroju kwadratowym, wykonanych ze stali dwufazowej (Docol 1000DP) i martenzytycznej (Docol 1200M). Absorbery ze stali martenzytycznej wykazały wyższy poziom zaabsorbowanej energii, jednak konstrukcje ze stali DP cechował wyższy wskaźnik stabilności zgniatania podczas osiowej deformacji absorbera, w odniesieniu do kolumnowych absorberów energii jest to pożądana cecha.

1.5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z PRZEGLĄDU LITERATUROWEGO

Stale karoseryjne o zwiększonej wytrzymałości stanowią potencjał projektowy do tworzenia lekkich i bezpiecznych konstrukcji energochłonnych wykorzystywanych w pojazdach drogowych i szynowych. Głównie dzięki korzystnemu stosunkowi wytrzymałości i ceny do masy oraz zwiększonemu potencjału wtórnego przetworzenia w stosunku do innych materiałów, jak np. aluminium lub materiały kompozytowe. Stale HSS i AHSS są materiałami coraz częściej stosowanymi w konstrukcjach pojazdów drogowych i szynowych, odpowiedzialnych za bezpieczeństwo bierne pasażerów. O zwiększeniu stosowalności stali AHSS świadczy również ich ciągły rozwój, czego przykładem może być pojawienie się na rynku nowych gatunków reprezentujących już trzecią generację stali AHSS. Ponadto, stal ta znalazła zastosowanie w produkcji coraz bardziej popularnych pojazdów elektrycznych jako materiał zabezpieczający baterie przed uszkodzeniem mechanicznym. Podobny charakter

aplikacji można również zaobserwować w elektrycznych pojazdach szynowych oraz elektrycznych pojazdach ciężarowych.

Problemy związane ze spawalnością stali AHSS są jednym z głównych ograniczeń stosowalności stali w przemyśle motoryzacyjnym i kolejowym. Dynamiczny rozwój technologii laserowych, zwłaszcza włóknowych źródeł laserowych oraz spawalniczych głowic laserowych powoduje coraz częstsze wykorzystanie tej metody łączenia materiałów we wszystkich gałęziach przemysłu, a zwłaszcza w motoryzacji. Wielu naukowców podejmuje badania z zakresu tematyki oceny możliwości wykorzystania wiązki laserowej do łączenia blach AHSS oraz jej wpływu na mikrostrukturę i parametry wytrzymałościowe. Większość prac dotyczy głównie badań w zakresie obciążeń quasi–statycznych, nieliczne zaś publikacje związane są z badaniem złączy spawanych doczołowo wiązką laserową w zakresie średnich i dużych poziomów szybkości odkształcenia. Ponadto, w literaturze przedmiotowej brakuje informacji związanych z badaniem doczołowych połączeń spawanych laserowo wykonywanych w blachach o grubości 2 mm. Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod do oceny reakcji materiałów w warunkach jednoosiowego rozciągania dynamicznego jest metoda dzielonego pręta Hopkinsona, która doczekała się unormowania w 2010 r. i aktualizacji normy w 2018 r. (PN-EN ISO 26203-1:2018).

- strona celowo pozostawiona pusta -

ROZDZIAŁ 2

CEL I ZAKRES PRACY

2.1. CEL I TEZA PRACY

W trakcie analizy literatury z zakresu wytwarzania stalowych konstrukcji energochłonnych stwierdzono, że zakres prowadzonych badań związanych z oceną jakości połączeń spawanych laserowo jest ograniczony głównie do standardowych metod, tj. badań nieniszczących, statycznej próby rozciągania, pomiarów twardości oraz oceny mikrostruktury złącza spawanego za pomocą badań mikroskopowych. Liczne przykłady literaturowe oraz własne obserwacje dotyczące projektowania absorberów energii mechanicznej produkowanych w miejscu pracy doktoranta dowodzą jednak, że ww. metody są niewystarczające do wiarygodnej oceny jakości otrzymywanych połączeń. W związku z powyższym postawiono tezę pracy, która brzmi następująco: **standardowe metody oceny jakości połączeń spawanych są niewystarczające do oceny wytrzymałości konstrukcji z blach stalowych poddanych obciążeniom dynamicznym**. W związku z tym, proponuję w mojej pracy **uzupełnienie metod oceny właściwości mechanicznych połączenia spawanego o technikę dzielonego pręta Hopkinsona**, która umożliwia charakteryzację mechaniczną materiałów w warunkach dużych szybkości odkształcenia.

Ponadto, w istniejącej literaturze stwierdziłem ograniczoną liczbę opisów badań połączeń spawanych w warunkach obciążenia dynamicznego. Większość publikacji z tej dziedziny ogranicza się do prezentacji wyników badań dynamicznych materiałów konstrukcyjnych przewidzianych do spawania, z pominięciem wytrzymałości dynamicznej samych połączeń. Jedynie w nielicznych publikacjach podejmowane są próby poszukiwania korelacji pomiędzy parametrami technologicznymi procesu spawania, a wytrzymałością dynamiczną połączeń spawanych. W związku z obserwowanym współcześnie trendem, polegającym na wprowadzaniu na rynek nowych gatunków stali wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym i kolejowym, coraz częściej wykorzystywaną technologią w skali przemysłowej do łączenia cienkich blach jest metoda spawania laserowego. Celem naukowym pracy jest zatem **poszukiwanie korelacji pomiędzy jakością procesu spawania**

laserowego cienkich blach ze stali o podwyższonej wytrzymałości, a wytrzymałością dynamiczną połączenia spawanego.

2.2. ZAKRES ROZPRAWY

W związku z postawionym celem pracy przyjęto, iż będzie ona miała charakter doświadczalny, a jej zakres obejmować będzie badania technologiczne, wytrzymałościowe i materiałowe. W przypadku badanych typów złącz spawanych, zasadniczą część pracy stanowią badania złącz wykonanych metodą spawania laserowego przy użyciu płamek procesowych o średnicach 0,3 mm i 0,6 mm. Złącza spawane, w których wykorzystano dodatkowe procesy cieplne w postaci podgrzewania przed spawaniem oraz dodatkowe wygrzewanie po spawaniu są efektem podjętych prób mających na celu zwiększenie ciągliwości złącz spawanych. Zakres pracy przedstawia się zatem następująco:

1. Adaptacja stanowiska dzielonego pręta Hopkinsona z wariantu na ściskanie do układu pozwalającego na prowadzenie testów dynamicznych na rozciąganie.
2. Zaprojektowanie, wykonanie i walidacja konstrukcji uchwytów mocujących płaską próbkę pomiędzy prętami Hopkinsona, dedykowanych do testów na rozciąganie.
3. Zaprojektowanie i wykonanie oprzyrządowania spawalniczego do powtarzalnego pozycjonowania stalowych blach (półfabrykatów próbek wytrzymałościowych) podczas procesu spawania laserowego.
4. Spawania laserowe stalowych półfabrykatów z zastosowaniem dwóch wariantów średnic płamek procesowych.
5. Zastosowanie dodatkowych zabiegów cieplnych w celu zwiększenia energii deformacji złącz spawanych laserowo.
6. Dokonanie oceny złączy spawanych laserowo z wykorzystaniem nieniszczących technik badawczych.
7. Wykonanie badań wytrzymałościowych dla próbek niespawanych i spawanych laserowo w zakresie małych, średnich i dużych szybkości odkształcenia. Zaplanowany zakres badań wytrzymałościowych przedstawiono w tab. 3.
8. Zaprojektowanie i wykonanie miniaturowych absorberów energii mechanicznej spawanych laserowo.

9. Przeprowadzenie badań zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia quasi-statycznego i uderowego.
10. Ocena mikrostruktury i pomiarów mikrotwardości połączeń spawanych laserowo.

Tab. 3. Zakres przeprowadzonych badań wytrzymałościowych (znacznikiem oznaczono zrealizowane badania)

		<i>Strenx S700MC</i>			<i>Docol 800DP</i>			<i>Docol 1000DP</i>			<i>Docol 1200M</i>			<i>Docol 1500M</i>		
		0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°
$10^{-3} s^{-1}$	niespawana															
	spawana06															
	spawana03															
	podgrzewanie przed spawaniem															
	wygrzewanie po spawaniu															
$1 s^{-1}$	niespawana															
	spawana06															
	spawana03															
	podgrzewanie przed spawaniem															
	wygrzewanie po spawaniu															
$10^3 s^{-1}$	niespawana															
	spawana06															
	spawana03															
	podgrzewanie przed spawaniem															
	wygrzewanie po spawaniu															

- strona celowo pozostawiona pusta -

ROZDZIAŁ 3

MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

3.1. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MATERIAŁÓW

Przedmiotem badań podjętych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej jest pięć gatunków stalowych blach, tj. Strenx S700MC, Docol 800DP, Docol 1000DP, Docol 1200M i Docol 1500M. Są to stale o zróżnicowanych właściwościach wytrzymałościowych, które wykorzystuje się głównie w branży motoryzacyjnej do produkcji części wchodzących zarówno w strukturę podwozia, jak i nadwozia pojazdów drogowych. Materiały pozyskano z magazynu próbek materiałowych szwedzkiej huty SSAB w postaci arkuszy blach o grubości 2 mm i wymiarach 1000 x 2000 mm. Blachy w stanie dostawy pokryte były cienkim filmem olejowym bez powłoki antykorozyjnej. Stal Strenx S700MC jest materiałem walcowanym termomechanicznie, pozostałe gatunki to materiały zimnowalcowane. Łącznie pozyskano 15 arkuszy blach, każdego gatunku po 3 arkusze. W tab. 4 zestawione dane dotyczące składu chemicznego badanych materiałów. Są to dane producenta dostarczone wraz z blachami w formie certyfikatów materiałowych zgodnych z normą PN-EN 10027-2. W związku z faktem, że na rynku są dostępne blachy innych producentów tego samego gatunku stali, różniących się jednak parametrami wytrzymałościowymi, dlatego w dalszej części pracy będą wykorzystywane jedynie nazwy handlowe badanych materiałów.

Tab. 4. Skład chemiczny badanych stali (na podstawie certyfikatu materiałowego dostarczonego wraz z materiałem przez producenta)

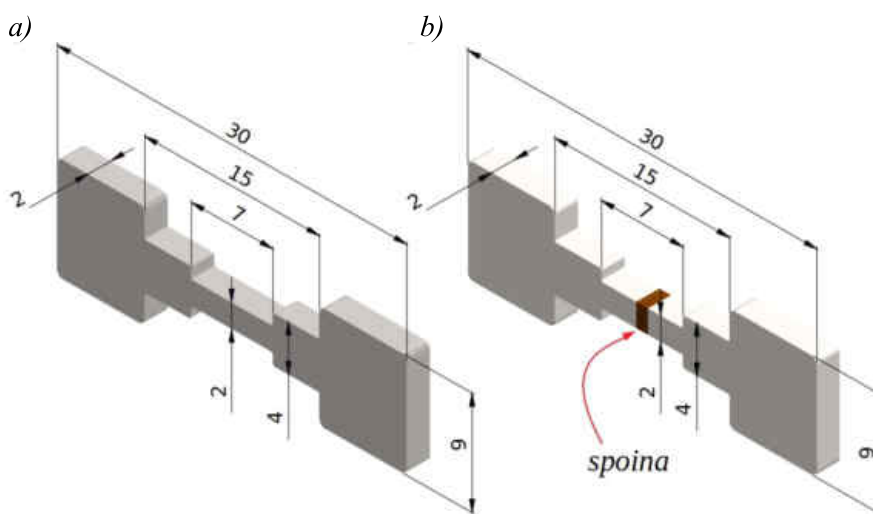
Materiał (nazwa handlowa)	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Al	Cu	Nb	V	C_{ekv}
Strenx S700MC	0,059	0,01	1,68	0,012	0,02	0,04	0,046	0,01	0,061	0,01	0,35
Docol 800DP	0,133	0,18	1,51	0,009	0,03	0,04	0,04	0,01	0,014	0,02	0,38
Docol 1000DP	0,130	0,21	1,47	0,011	0,02	0,03	0,047	0,01	0,017	0,01	0,38
Docol 1200M	0,151	0,21	1,59	0,009	0,02	0,04	0,04	0,01	0,000	0,02	0,39
Docol 1500M	0,208	0,20	1,00	0,009	0,02	0,04	0,043	0,17	0,000	0,01	0,39

3.2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH NA ROZCIĄGANIE

Czynności niezbędne do przygotowania próbek materiałowych wykonano w firmie Bozamet w Siedlcach – miejscu pracy doktoranta, natomiast proces spawania laserowego przeprowadzono w udostępnionym przez firmę LaserTec w Tychach laboratorium spawalniczym.

3.2.1. Geometria próbki materiałowej

Na rys. 26a i rys. 26b przedstawiono geometrię niespawanych i spawanych laserowo próbek materiałowych, stosowanych w badaniach wytrzymałościowych w warunkach testu rozciągania. Ze względu na trudności związane z pomiarem wydłużenia podczas badań w zakresie dużych szybkości odkształcenia oraz sugestie zawarte w normie PN-EN ISO 26203-1:2018 dotyczące porównywania wyników badań w szerokim zakresie szybkości odkształcenia, wykorzystano taką samą geometrię próbki dla wszystkich poziomów szybkości odkształcenia, tj. 10^{-3} , 10^0 i $10^3 s^{-1}$. W związku z przyjętą konfiguracją stanowiska SHPB na rozciąganie, założono, że mocowanie i pozycjonowanie próbki w uchwytach będzie definiowane w sposób umożliwiający zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia znaczących drgań (oscylacji) w układzie prętów Hopkinsona. Aby osiągnąć szybkości odkształcenia na poziomie $10^3 s^{-1}$ wykorzystano próbki o długości części pomiarowej wynoszącej 7 mm.



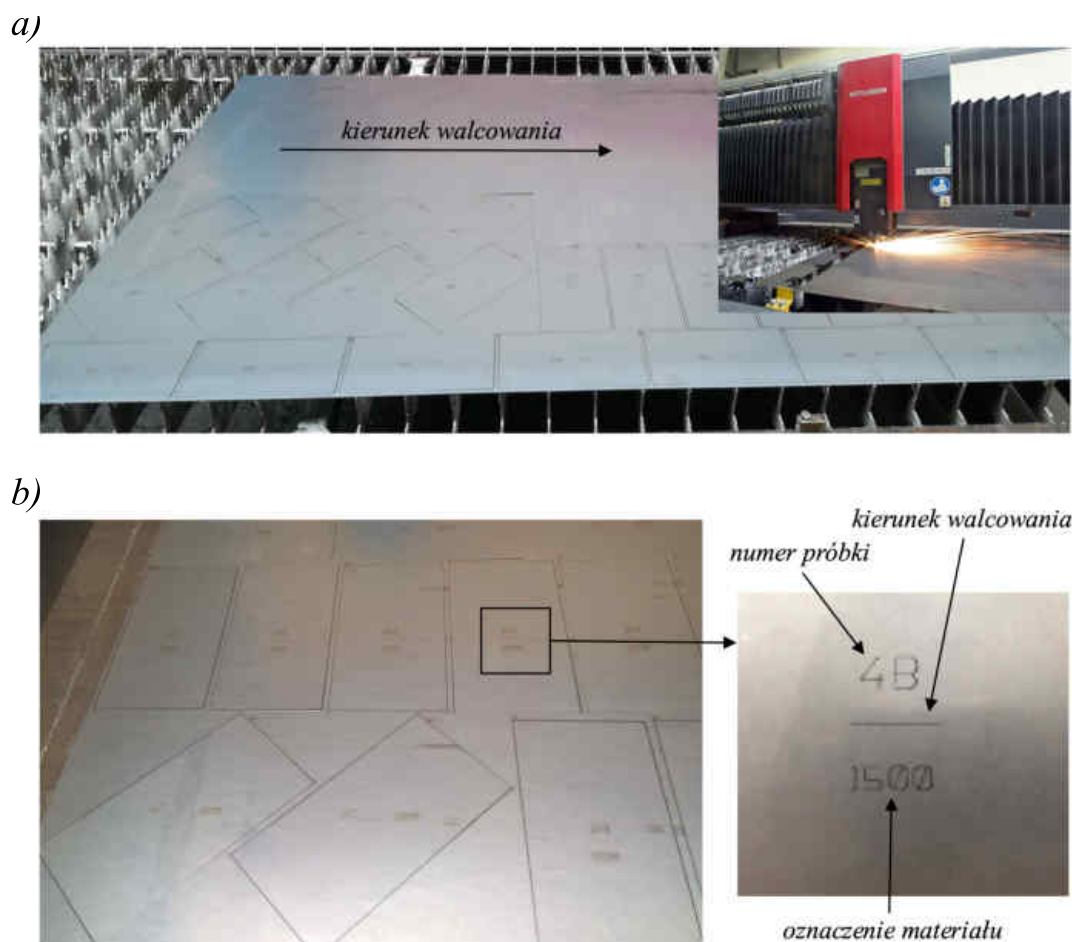
Rys. 26. Geometria próbek materiałowych do badań wytrzymałościowych na rozciąganie: próbka niespawana a) i próbka spawana laserowo b)

3.2.2. Przygotowanie próbek materiałowych do testów na rozciąganie

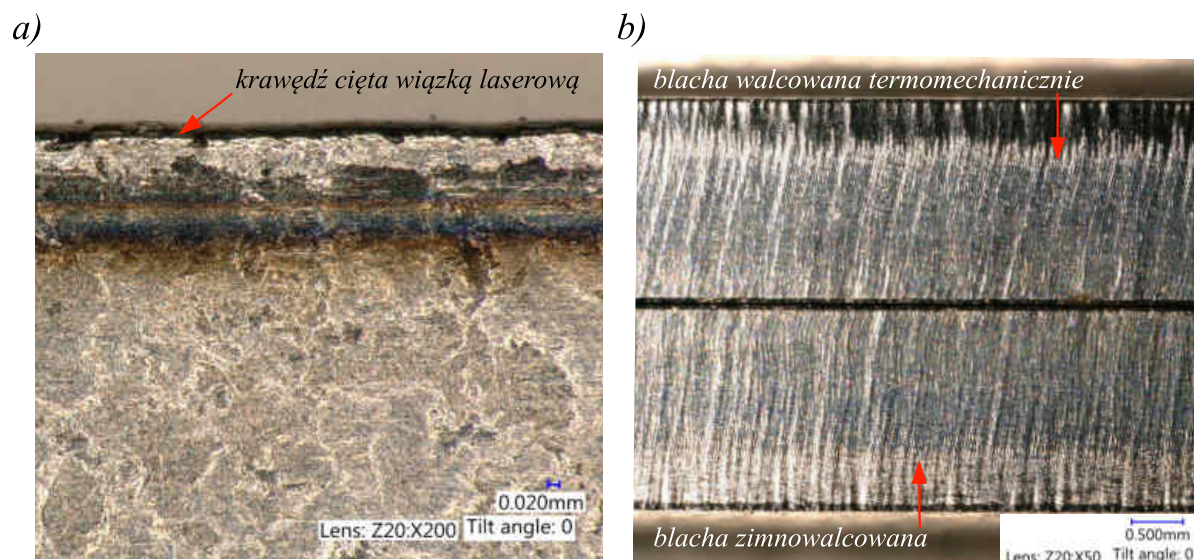
Przygotowanie próbek materiałowych rozpoczęto od **wycinania laserowego** półfabrykatów za pomocą wycinarki laserowej Mitsubishi ML3015ex wyposażonej w rezonator gazowy o mocy 4500 W. Wycinarka posiada stół roboczy umożliwiający obróbkę arkuszy o wymiarach 1500 x 3000 mm. Z blach o wymiarach 1000 x 2000 mm i grubości 2 mm wycięto dwa typy półfabrykatów (rys. 27a):

- typu **A** o wymiarach 105 x 240 mm;
- typu **B** o wymiarach 105 x 220 mm.

Precyzyjny dobór parametrów cięcia laserowego umożliwił uzyskanie jakości powierzchni ciętych zgodnych z normą PN-EN 9013 – 111. Widok krawędzi wraz ze strefą oddziaływania cieplnego oraz powierzchni blach po cięciu laserowym przedstawiono odpowiednio na rys. 28a i rys. 28b. Każdy wycięty półfabrykat znakowano laserowo numerem umożliwiającym jego lokalizację na arkuszu. Ponadto, na półfabrykatakach naniesiono linie oznaczające kierunek walcowania blachy oraz liczby identyfikujące gatunek materiału (rys. 27b). Zdecydowano się na wycinanie dwóch typów półfabrykatów o różnych wymiarach ze względu na wymagania konstrukcyjne oprzyrządowania spawalniczego umożliwiającego powtarzalne pozycjonowanie blach względem wiązki laserowej. Konstrukcja oprzyrządowania spawalniczego zostanie omówiona w kolejnej części pracy.

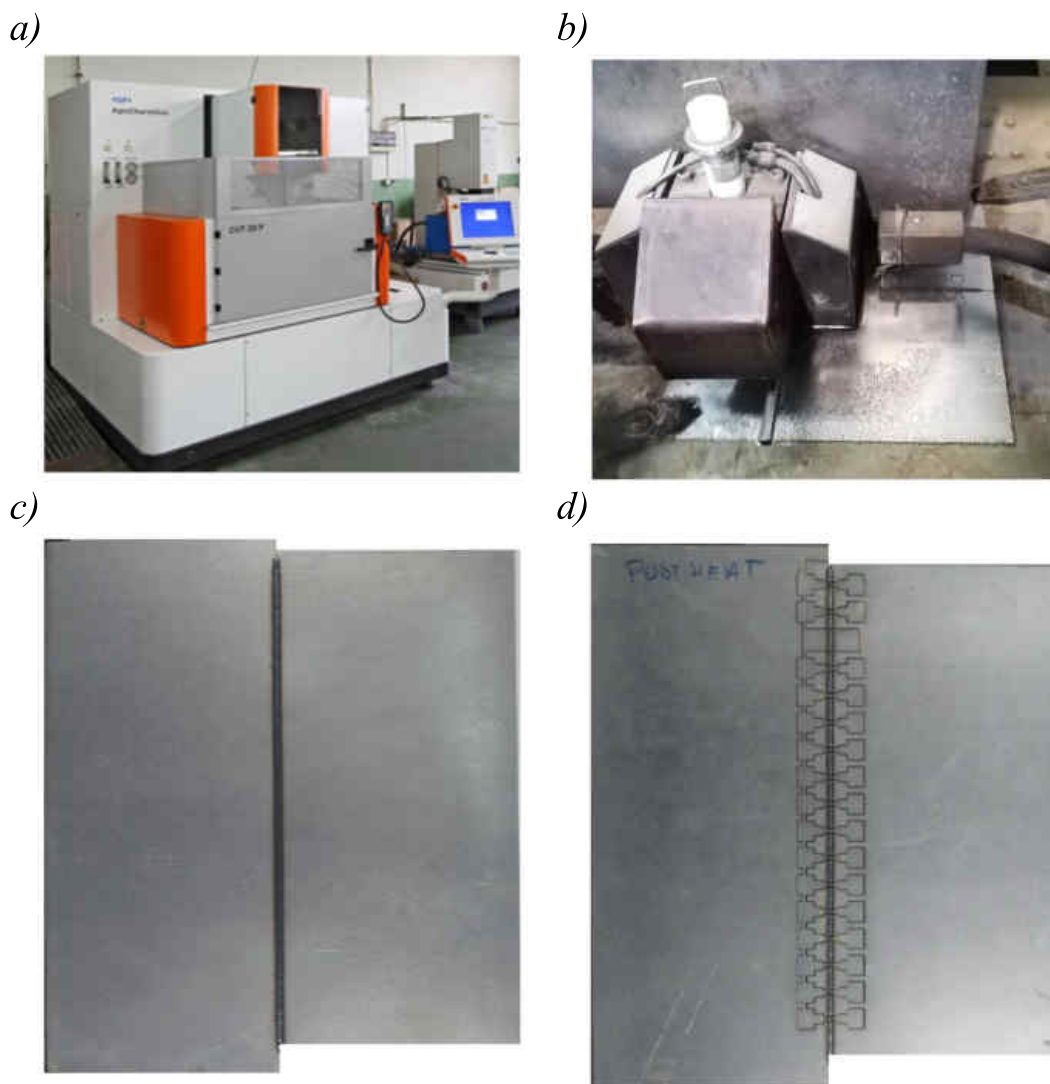


Rys. 27. Widok arkusza blachy z wyciętymi półfabrykatami a) oraz sposób ich oznaczania za pomocą procesu znakowania laserowego b)



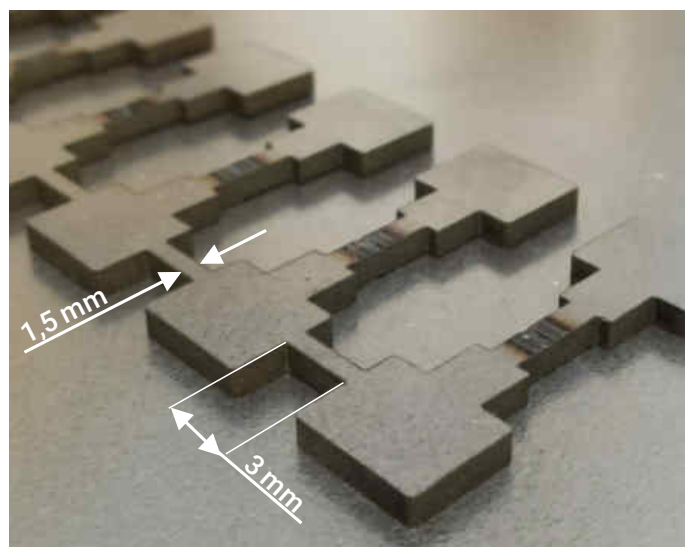
Rys. 28 . Widok z góry krawędzi ciętej z widoczną strefą oddziaływania cieplnego a) oraz widok powierzchni ciętych dwóch blach - górna walcowana termomechanicznie oraz dolna zimnowalcowana b)

W kolejnym etapie procesu wytwarzania obydwie typy półfabrykatów połączono ze sobą doczołowo za pomocą metody spawania laserowego. Szczegółowy opis poszczególnych etapów procesu spawania zostanie przedstawiony w kolejnym rozdziale. Próbki materiałowe wycięto za pomocą zanurzeniowej drążarki elektroerozyjnej Agie Charmilles CUT20P (rys. 29a i rys. 29b) wyposażonej w automatyczny system pozycjonowania drutu względem obrabianego materiału. Próbki niespawane wycięto z półfabrykatów typu **B**, zaś próbki spawane z formatki uzyskanej w wyniku połączenia półfabrykatów typu **A** i **B** (rys. 29c). Widok formatki oraz wyciętych próbek przedstawiono na (rys. 29d). Różnica w długości spawanych półfabrykatów umożliwiła powtarzalne pozycjonowanie drutu (jako elektrody roboczej) bezpośrednio w osi złącza spawanego.



Rys. 29. Widok półfabrykatów pospawanych laserowo przed wycinaniem elektroerozyjnym a) i po wycinaniu elektroerozyjnym b)

W celu osiągnięcia wysokiej powtarzalności cięcia elektroerozyjnego, próbki wycinano z dodatkowymi złączami pomiędzy nimi, widocznymi na rys. 30. Geometria tych złączy została dobrana na podstawie szeregu prób technologicznych oraz doświadczeń własnych autora pracy z zakresu wykorzystania technologii cięcia elektroerozyjnego. Po zakończeniu procesu cięcia, próbki ręcznie usuwano z formatek, a pozostałości materiału po złączach występujące na powierzchniach bocznych części chwytowej próbki usuwano za pomocą stacjonarnej szlifierki tarczowej.



Rys. 30. Widok wyciętych próbek materiałowych z oznaczonymi wymiarami złączy pomiędzy próbkami

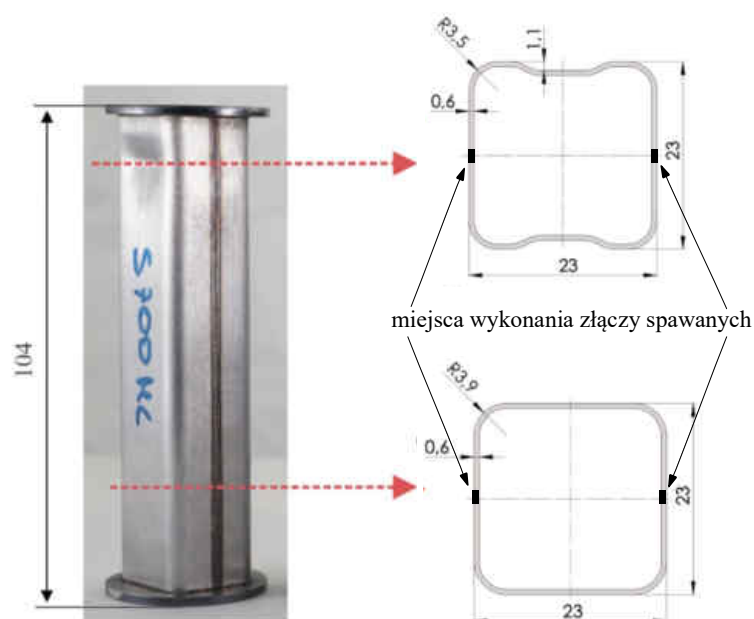
3.3. PRZYGOTOWANIE MINIATUROWYCH ABSORBERÓW ENERGII MECHANICZNEJ

Prace związane z przygotowaniem miniaturowych absorberów energii mechanicznej zrealizowano w firmie Bozamet oraz w IPG Poland w Gliwicach. Natomiast badania właściwości mechanicznych przeprowadzono w Zakładzie Technologii i Eksploatacji Uzbrojenia, Instytutu Techniki Uzbrojenia Wojskowej Akademii Technicznej.

3.3.1. Geometria absorberów energii mechanicznej

Na rys. 31 przedstawiono geometrię miniaturowego absorbera energii mechanicznej. W pracy zaproponowano wykonanie absorbera w postaci profilu o przekroju zamkniętym, składającym się z dwóch giętych profili, połączonych ze sobą za pomocą metody spawania laserowego oraz dwóch dodatkowych podkładek ochronnych przyklejonych do powierzchni

czołowych absorbera. W celu zaprogramowania początku procesu zgniatania absorbera wykonano na jego powierzchniach bocznych dwa inicjatory zgniotu w postaci lokalnych wgnieceń. Inicjatory zgniotu wykonano w odległości 10 mm od czołowej powierzchni absorbera, na przeciwnych, niespawanych powierzchniach.



Rys. 31. Geometria miniaturowego absorbera energii mechanicznej

3.3.2. Etapy procesu wytwarzania miniaturowych absorberów energii mechanicznej

Wykonanie absorberów energii mechanicznej rozpoczęto od wycinania laserowego półfabrykatów o wymiarach 120 x 42 mm z arkuszy blach o grubości 2 mm. W procesie wytwórczym wykorzystano arkusze blach, z których wycinano wcześniej próbki materiałowe do testów wytrzymałościowych. Dłuższą krawędź półfabrykatu pozycjonowano równolegle względem kierunku walcowania materiału. Po wycięciu blach poddano je szlifowaniu z wykorzystaniem sterowanej numerycznie szlifierki do płaszczyzn G+H Schleiftechnik z obróbczym stołem magnetycznym (rys. 32). Półfabrykaty szlifowano z obydwu stron do grubości 0,6 mm, równolegle do kierunku walcowania. Szlifowanie blach wykonano z użyciem cieczy chłodzącej w celu niedopuszczenia do przegrzania materiału półfabrykatu i zmiany jego właściwości mechanicznych. Przyjęta grubość ścianki absorbera wynika z maksymalnej energii

zgniatania możliwej do osiągnięcia na stanowisku badawczym przewidzianym do realizacji testów oceny energochłonności w warunkach obciążenia dynamicznego.



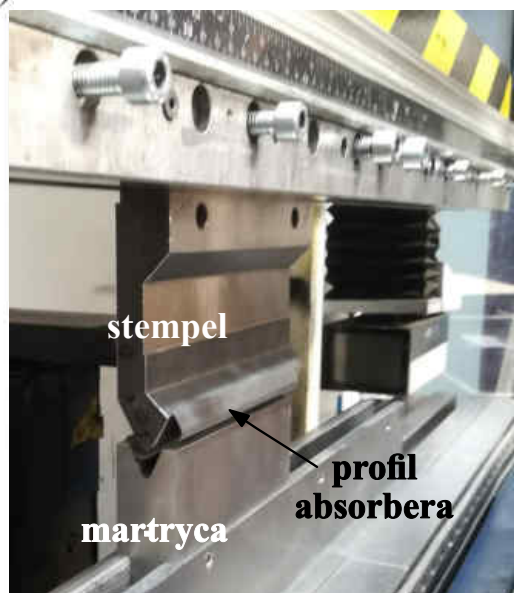
Rys. 32. Widok szlifierki do płaszczyzn G+H Schleiftechnik

W kolejnym etapie wytwarzania miniaturowych absorberów energii przeprowadzono proces obróbki plastycznej na serwo-mechanicznej prasie krawędziowej TRUMPF True Bend 7036 (rys. 33a) o maksymalnej sile nacisku 360 kN. Do procesu gięcia wykorzystano narzędzia kształtujące w postaci stempla i matrycy, które odpowiednio zmodyfikowano uwzględniając wymagany promień gięcia oraz kształt profilu „połówki” absorbera (rys. 33b).

a)

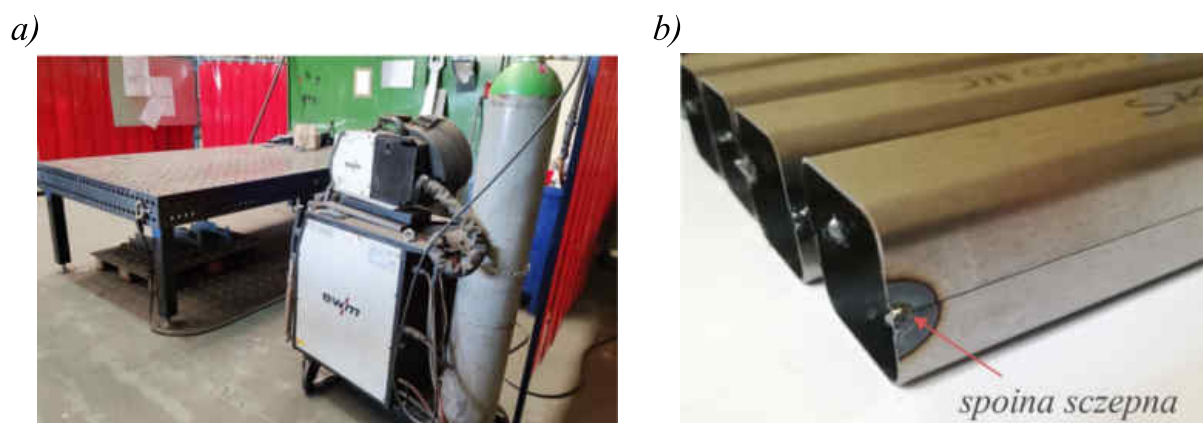


b)



Rys. 33. Widok prasy krawędziowej TRUMPF TrueBend 7036 a) oraz widok narzędzi kształtujących wraz z obrabianym detalem podczas procesu gięcia b)

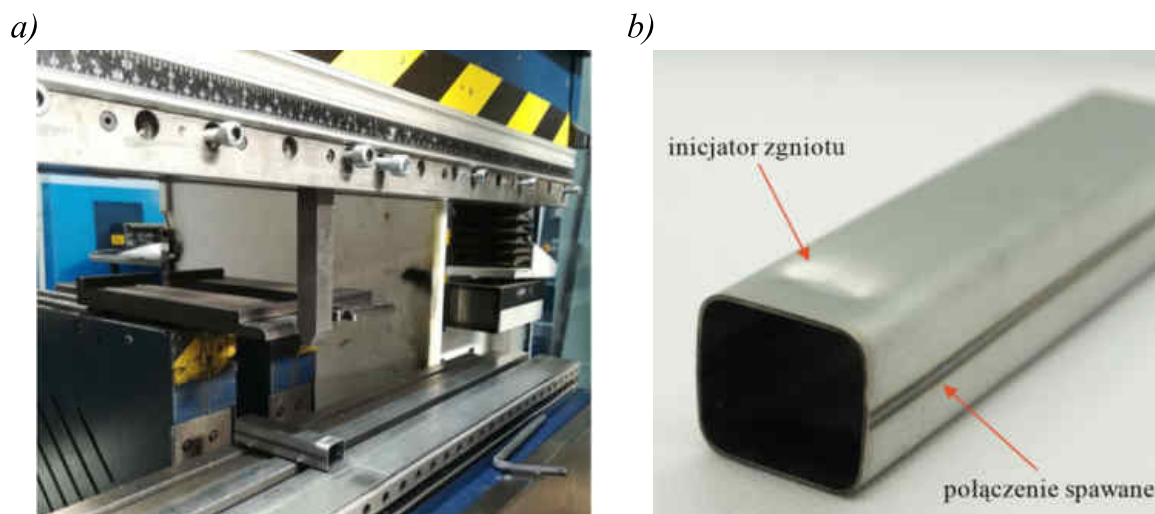
W celu jednoznacznego pozycjonowania dwóch profili tworzących korpus absorbera, przed spawaniem laserowym łączono je ze sobą spoinami szepnymi (rys. 34b) wykonanymi w technologii MAG (*ang. Metal Active Gas*). W każdym korpusie absorbera wykonywano cztery spoiny, po dwie na każdym końcu. W procesie łączenia wykorzystano ściski spawalnicze oraz rastrowy stół montażowy. Proces szepiania przeprowadzono z wykorzystaniem spawarki EWM Titan (rys. 34a).



Rys. 34. Stanowisko spawalnicze wyposażone w spawarkę EWM oraz montażowy stół spawalniczy a) oraz widok korpusów absorberów z wykonanymi spoinami szepnymi b)

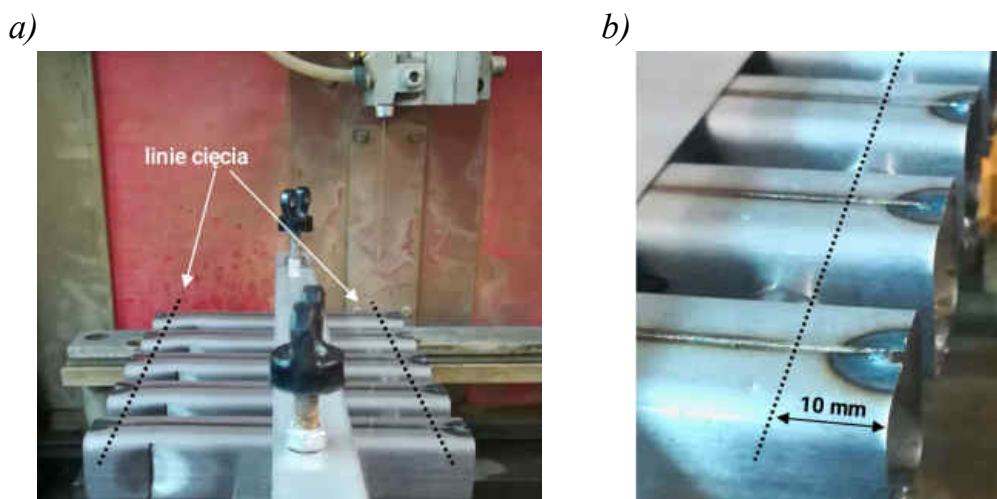
W kolejnym, kluczowym ze względu na energochłonność, etapie wytwarzania absorberów, przeprowadzono proces spawania laserowego połówek absorbera. Ze względu na złożoność tej operacji, szczegółowy opis przebiegu procesu spawania laserowego zostanie przedstawiony w dalszej części pracy.

Zespawane profile absorbera zostały następnie poddane operacji formowania inicjatora zgniotu za pomocą numerycznej prasy krawędziowej TRUMPF True Bend 7036 ze specjalnie ukształtowanym stemplem zamocowanym do suwaku prasy krawędziowej (rys. 35a). Inicjatory wykonywano po obu stronach absorbera na jego niespawanych powierzchniach (rys. 35b). Ze względu na różne właściwości mechaniczne badanych materiałów, niezbędne było zastosowanie różnych odległości zagłębienia stempla, które modyfikowano za pomocą numerycznego systemu sterowania prasy krawędziowej.



Rys. 35. Widok części roboczych prasy krawędziowej wraz z absorberem a) oraz widok korpusu absorbera wraz z wykonanym inicjatorem zgniotu b)

Absorbery z wytłoczonymi inicjatorami zgniotu następnie przycinano do wymaganych wymiarów za pomocą metody cięcia elektroerozyjnego. Obydwa końce poddawano procesowi cięcia celem usunięcia spoin szczepnych, uzyskania wymaganej długości absorbera oraz równoległości powierzchni ciętych, widok absorberów z zaznaczonymi liniami cięcia przedstawiono na rys. 36a. Absorbery wycinano w pakietach po 5 sztuk, bazując je na stole obróbczym oraz dociskając aluminiowym profilem z góry (rys. 36b). Precyzja wykonania absorberów po operacji obcinania elektroerozyjnego mieściła się w przyjętej tolerancji wymiarowej według ISO 2768-fK.



Rys. 36. Widok spozycjonowanych miniaturowych absorberów energii przed procesem cięcia elektroerozyjnego a) oraz widok końców absorberów z widoczną spoiną szcepną oraz z zaznaczoną linią cięcia b)

Ostatnią operacją wykonania miniaturowych absorberów energii mechanicznej było przyklejenie stalowych podkładek o średnicy 35 mm, zamykających z dwóch stron powierzchnie czołowe korpusu absorbera. Podkładki wykonano ze stali Strenx S700 MC o grubości 2 mm i przyklejono je za pomocą cyjano-akrylowego kleju Loctite 454 w postaci żelu. Powierzchnie klejone oczyszczono wcześniej za pomocą alkoholu izopropylowego. Na rys. 37 przedstawiono 5 absorberów (po jednym z każdego badanego gatunku materiału) z przyklejonymi podkładkami.



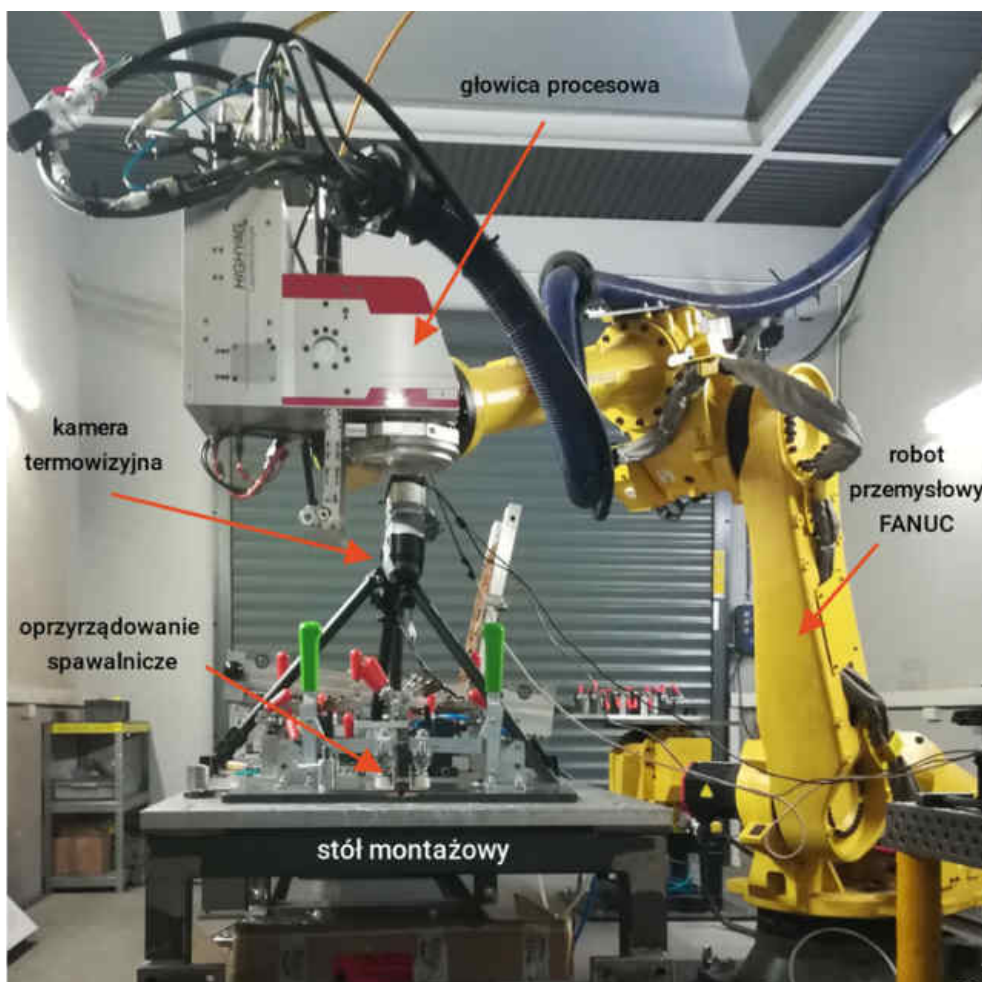
Rys. 37. Widok miniaturowych absorberów energii mechanicznej z przyklejonymi podkładkami ochronnymi

3.4. CHARAKTERYSTYKA PROCESU SPAWANIA WIĄZKĄ LASEROWĄ

3.4.1. Charakterystyka procesu technologicznego spawania próbek materiałowych

Spawanie laserowe próbek materiałowych przeprowadzono z wykorzystaniem celi spawalniczej, której wnętrze przedstawiono na rys. 38. Głównymi elementami celi spawalniczej są: źródło spawalnicze IPG YLR-8000 pracujące w trybie pracy ciągłej, o maksymalnej mocy 8 kW, 6-osiowy robot przemysłowy Fanuc 2000iB, skanująca głowica procesowa producenta HighYAG RLSK umożliwiająca spawanie z odległością ogniskową 510 mm, rastrowego stołu spawalniczego przytwierdzonego do posadzki w celi spawalniczej oraz dwóch światłowodów o średnicy 100 i 200 μm (w zależności od zastosowanego zestawu parametrów procesowych). Podczas spawania głowica spawalnicza znajduje się bezpośrednio

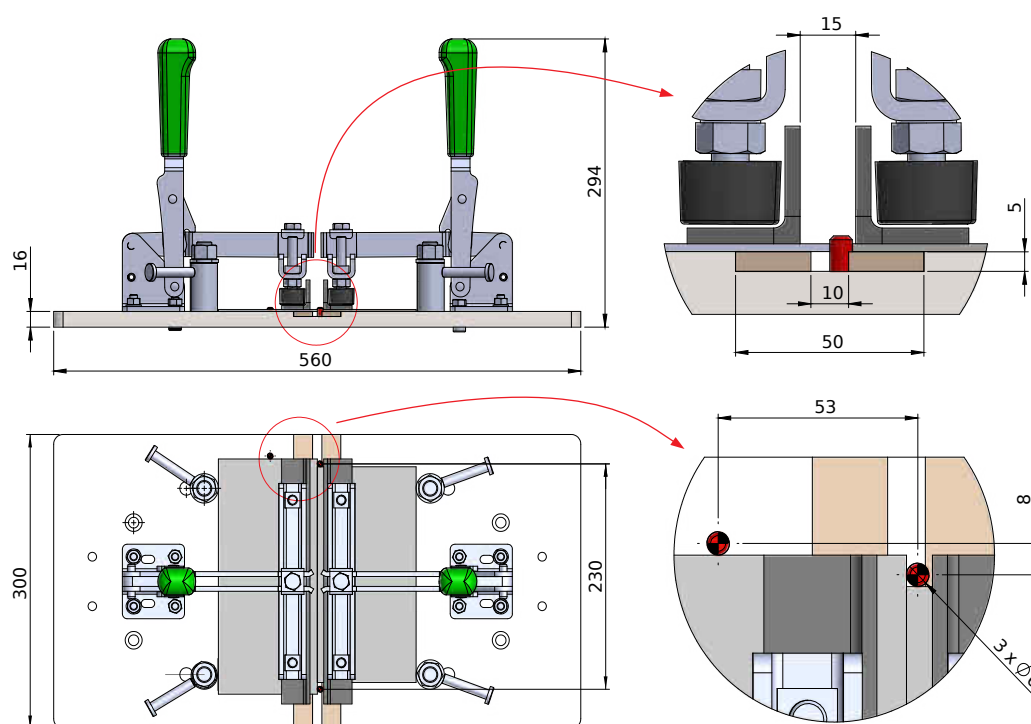
nad spawanymi blachami, natomiast ruch wiązki laserowej jest realizowany poprzez wewnętrzny układ napędowy głowicy. Spawanie przeprowadzono bez stosowania gazu osłonowego, a podczas wykonywania dodatkowych zabiegów cieplnych wykorzystano zamontowaną na statywie kamerę termowizyjną Infratec VarioCAM Head 800 pracującą w rozdzielczości 640x480 pikseli.



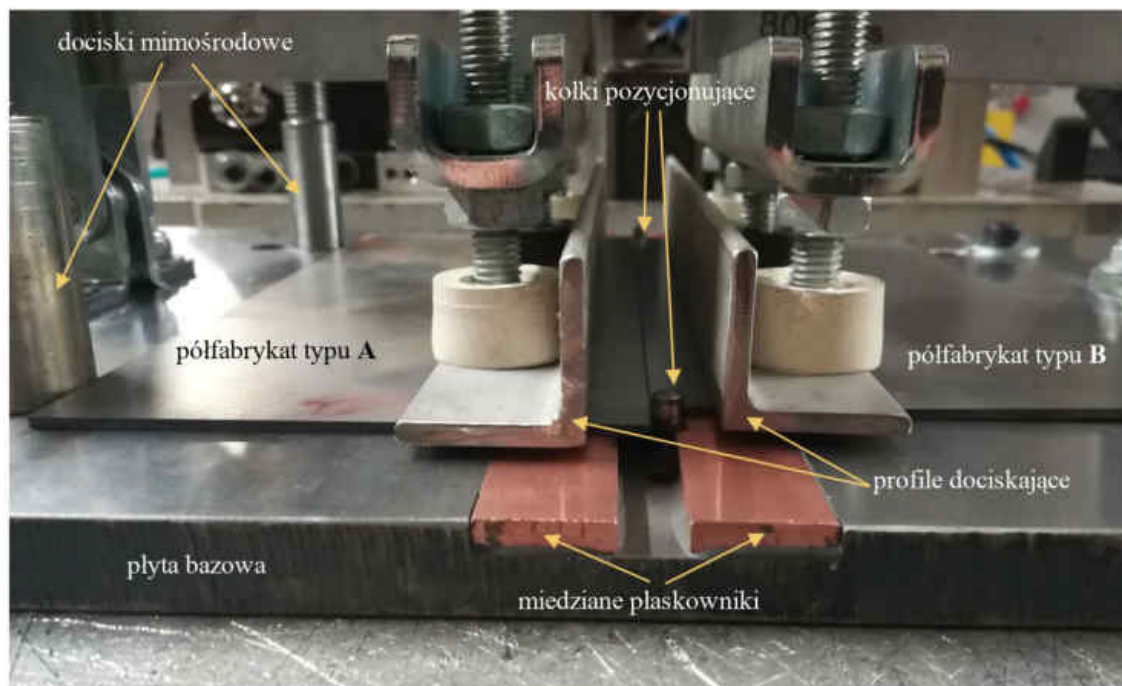
Rys. 38. Widok wnętrza celi spawalniczej wraz z wyposażeniem

W celu powtarzalnego pozycjonowania spawanych blach względem siebie i względem wiązki laserowej, a także w celu zapewnienia minimalnej szczeliny pomiędzy spawanymi blachami, zaprojektowano i wykonano ustawcze oprzyrządowanie spawalnicze. Narzędzie zamodelowano za pomocą oprogramowania SolidWorks, a jego schemat zaprezentowano na rys. 39. Zdjęcie wykonanego oprzyrządowania przedstawiano na rys. 40, na którym zaznaczono główne podzespoły do których należą: płyta bazowa, kołki pozycjonujące półfabrykaty, zaciski

mimośrodowe umożliwiające docisk półfabrykatu typu A do kołków pozycjonujących oraz półfabrykatu typu B do jednego z kołków i półfabrykatu typu A. Taki sposób pozycjonowania umożliwia powtarzalne pozycjonowanie blach względem wiązki laserowej oraz uzyskanie minimalnej szczeliny pomiędzy krawędziami spawanych blach nie większej niż 0,03 mm (szczelinomierz o tej grubości nie mieścił się w szczelinie pomiędzy blachami). Ręczne zaciski spawalnicze z elementami pośrednimi, dociskającymi stalowy kątownik w dwóch punktach pozwoliły na uzyskanie powtarzalnej płaskości spawanych blach, przede wszystkim w okolicy styku krawędzi blach. Wykorzystanie stalowych kątowników zagwarantowało przeniesienie siły docisku z uchwytów mocujących na powierzchnię półfabrykatów. W płycie bazowej wyfrezowano kanał, w który wklejono miedziane płaskowniki za pomocą kleju odpornego na wysokie temperatury. Po operacji wklejenia, płytę bazową przeszlifowaną z obydwu stron na szlifierce stołowej do płaszczyzn ze stołem magnetycznym w celu zapewnienia odpowiedniej jakości powierzchni płyty oraz jej stałej grubości. Dodatkowo, w płycie przyrządu, bezpośrednio pod złączem spawanym od strony grani, wykonano kanał mający na celu odprowadzenie części gazów powstających w trakcie procesu spawania laserowego.



Rys. 39. Widok przyrządu do spawania laserowego przygotowany z wykorzystaniem oprogramowania SolidWorks.



Rys. 40. Widok ogólny przyrządu spawalniczego z pozycjonowanymi i dociśniętymi półfabrykatami

Parametry procesowe spawania laserowego dobrano na podstawie szeregu prób przetapiania blachy stalowej o grubości 2 mm. Parametrem wyjściowym była prędkość spawania, którą dobrano na podstawie wyników testów spawania zawartych w pracy [120]. Po próbach przetapiania wykonano testy spawalnicze z użyciem docelowego oprzyrządowania. W trakcie tych testów skorygowano moc spawania oraz odległość ogniskową w celu wizualnej poprawy wyglądu lica spoiny. Dodatkowe zabiegi cieplne przeprowadzano bezpośrednio przed i po procesie spawania blach w oprzyrządowaniu spawalniczym. Pozycjonowanie wiązki laserowej odbywało się bez przemieszczania głowicy przez robota, umożliwił to wewnętrzny napęd układu optycznego głowicy spawalniczej. Temperaturę podgrzewania wstępnego (T_p) dobrano na podstawie formuły Seferiana [58] zgodnie z (5), gdzie $CE_{Seferian}$ (6) to ogólny równoważnik węglowy, a $CE_{SeferianC}$ (7) to zmodyfikowany równoważnik węglowy o grubość podgrzewanego materiału a .

$$T_p = 350 \sqrt{CE_{SeferianC} - 0,25} \quad (5)$$

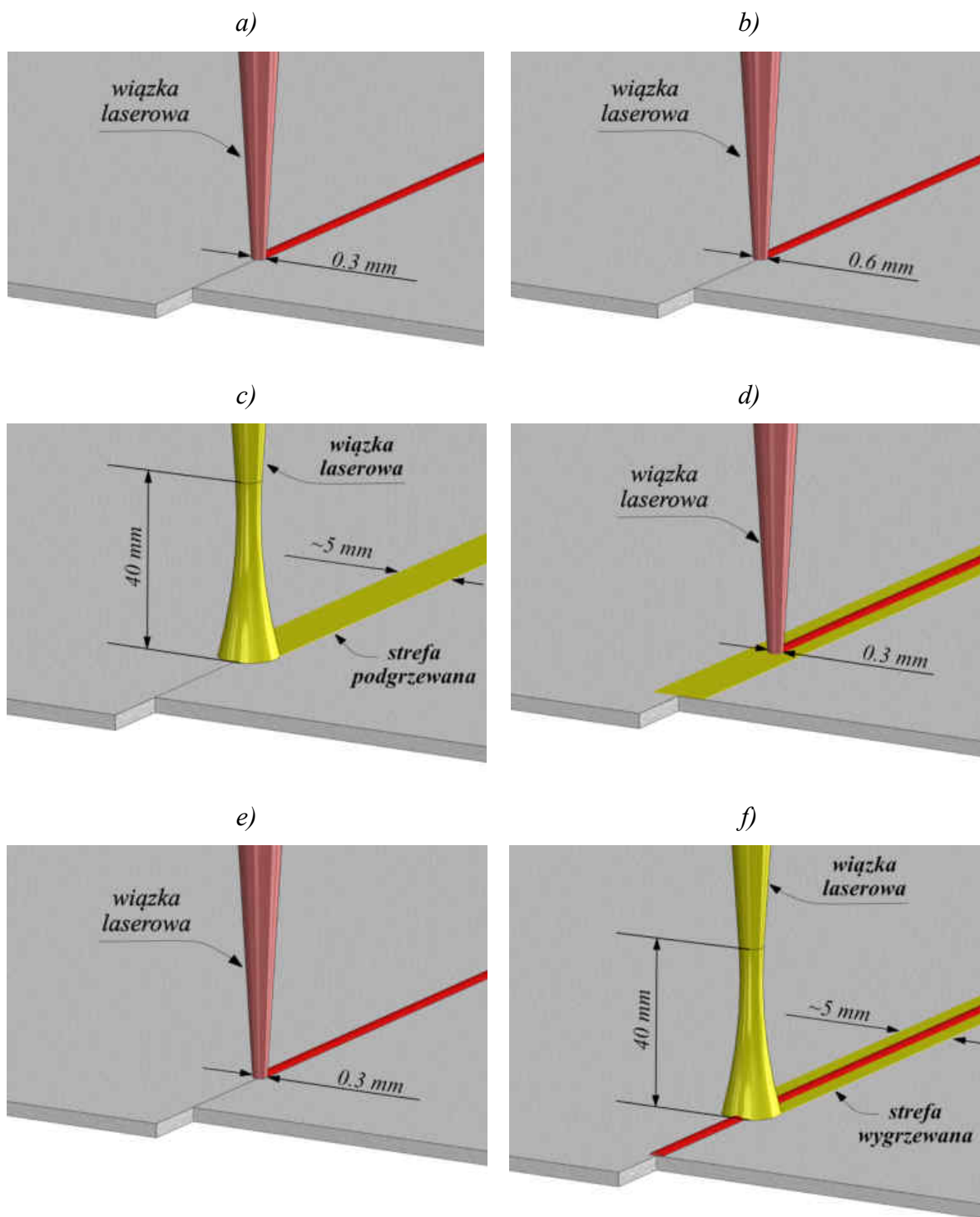
$$CE_{Seferian} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \quad (6)$$

$$CE_{SeferianC} = CE_{Seferian}(1 + 0,005 * a) \quad (7)$$

Parametry spawania laserowego, które ostatecznie zostały dobrane, przedstawiono w tab. 5. Z kolei, na rys. 41 przedstawiono w sposób graficzny przyjęte warianty spawania laserowego, tj. spawanie wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,3 mm (rys. 41a – wariant o nazwie **spawana03**) lub 0,6 mm (rys. 41b – wariant o nazwie **spawana06**), spawanie plamką procesową 0,3 mm ze wstępnym nagrzewaniem rozogniskowaną wiązką laserową (rys. 41c i d – wariant o nazwie **podgrzewana**) oraz spawanie plamką procesową 0,3 mm z wygrzewaniem spoiny rozogniskowaną wiązką laserową (rys. 41e i f – wariant o nazwie **wygrzewana**).

Tab. 5. Parametry procesu spawania laserowego oraz dodatkowych procesów cieplnych

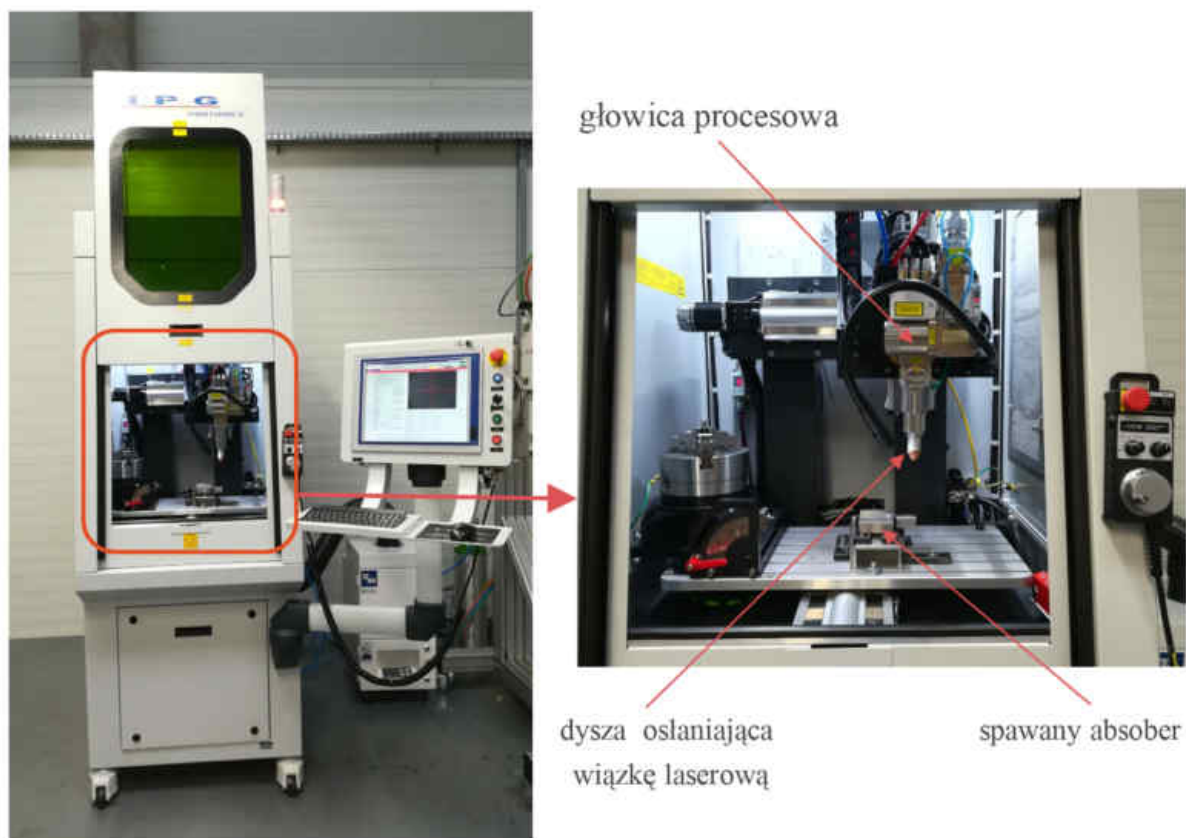
Parametr	Parametry zastosowanych procesów spawalniczych		Parametry dodatkowych procesów cieplnych	
	rys. 41b	rys. 41ade	rys. 41c	rys. 41d
Zadana moc lasera [W]	5200	3400	5000	2500
Średnica światłowodu [μm]	200	100	100	100
Średnica plamki procesowej [mm]	0,6	0,3	-	-
Odległość ogniskowa [mm]	520	520	560	560
Prędkość spawania [mm/s]	85	85	2000	85
Rodzaj ruchu wiązki laserowej	liniowy			
Kąt nachylenia głowicy	90 ° (prostopadle do spawanych blach)			
Ilość cykli	1	1	17	1
Temperatura wstępnego podgrzewania [°C]	-	-	95 - 105	-



Rys. 41. Graficzne odwzorowanie zaproponowanych w pracy wariantów procesu spawania: spawanie wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,3 mm a) lub 0,6 mm b), spawanie plamką procesową 0,3 mm ze wstępnym nagrzewaniem rozogniskowaną wiązką laserową c) d) oraz spawanie plamką procesową 0,3 mm z wygrzewaniem spoiny rozogniskowaną wiązką laserową e) f)

3.4.2. Charakterystyka procesu technologicznego spawania miniaturowych absorberów energii mechanicznej

Spawanie miniaturowych absorberów energii mechanicznej zrealizowano z wykorzystaniem urządzenia IPG Multi-Axis Compact, które przedstawiono na rys. 42. Do głównych podzespołów tego urządzenia zalicza się: ruchomy stół roboczy o wymiarach 250 x 250 mm, głowicę procesową FLW D30 z możliwością wykonywania ruchów oscylacyjnych, źródło laserowe typu YLR-450/4500-QCW zamontowane w dolnej części urządzenia w postaci „kieszeni” oraz światłowód o średnicy 50 μm . Źródło typu QCW (*ang. Quasi Continuous Wave*) skonfigurowano do pracy w trybie ciągłym o mocy maksymalnej 450 W. Ze względu na niedokładności wykonawcze poprzedzających procesów wytwórczych, skutkujących nierównomierną szerokością szczeliny pomiędzy łączonymi elementami absorbera, spawanie zrealizowano z wykorzystaniem oscylacyjnego trybu pracy głowicy procesowej. W tab. 6 przedstawiono parametry procesu oscylacyjnego spawania laserowego.



Rys. 42. Widok urządzenia do spawania laserowego miniaturowych absorberów energii

Tab. 6. Parametry spawania laserowego miniaturowych absorberów energii

Parametr	Wartość
Zadana moc lasera [W]	450
Średnica światłowodu [μm]	50
Średnica plamki procesowej [mm]	0,1
Odległość ogniskowa [mm]	200
Prędkość spawania [mm/s]	37,5
Rodzaj ruchu wiązki laserowej	Oscylacyjny (okrąg)
Kąt nachylenia głowicy	Prostopadle do spawanych profili
Częstotliwość ruchu oscylacyjnego [Hz]	500
Średnica ruchu oscylacyjnego [mm]	0,5

3.5. METODYKA WYZNACZENIA WYDŁUŻENIA RÓWNOMIERNEGO

Ze względu na trudności związane z dokładnym określeniem wydłużenia równomiernego i całkowitego próbki, szczególnie w trakcie badań w zakresie dużych szybkości odkształcenia, wydłużenie wyznaczano na podstawie pomiarów geometrii części roboczej próbki przed testem i po jej zerwaniu. Do wyznaczenia wartości wydłużenia równomiernego ε_r posłużono się zależnością (8):

$$\varepsilon_r = \frac{S_0 - S_r}{S_r} \quad (8)$$

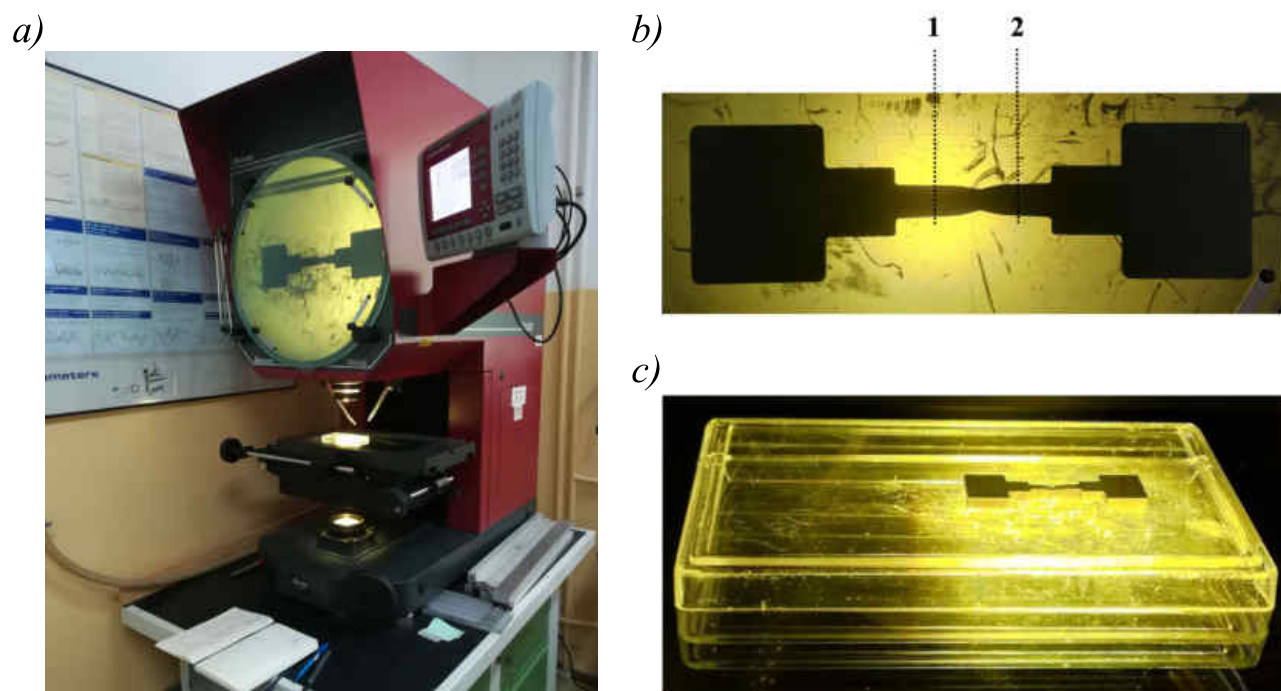
gdzie S_0 oznacza pole początkowe przekroju poprzecznego próbki, S_r jest to średnia wartość pól przekrojów mierzonych w połowie długości pomiędzy szyjką a końcem długości pomiarowej (przekroje 1 i 2 na rys. 43b). Przed testem wytrzymałościowym, grubość próbki i jej szerokość mierzono za pomocą mikromierza cyfrowego, zaś długość pomiarową za pomocą suwmiarki elektronicznej. Z kolei, grubość próbek po zerwaniu określano za pomocą mikromierza cyfrowego, natomiast pole przekrojów po zerwaniu próbki wyznaczano na podstawie pomiarów wykonanych za pomocą projektora pomiarowego (rys. 43a). W związku z tym, że pomiary te wymagały pozycjonowania zerwanych części próbki względem siebie, dlatego zastosowano prosty konstrukcyjnie szablon wykonany z transparentnego tworzywa

sztucznego z zamocowanymi w jego dolnej części okrągłymi magnesami neodymowymi. Za pomocą tych magnesów utwierdzano połówki zerwanej próbki w położeniu gwarantującym dokładny pomiar. Opisaną metodykę przygotowania i realizacji pomiaru wydłużenia równomiernego zastosowano do wszystkich badanych próbek materiałowych, spawanych i niespawanych.

Wydłużenie całkowite (ε_c) wyznaczono natomiast na podstawie równania (9):

$$\varepsilon_c = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (9)$$

gdzie L_u oznacza długość pomiarową próbki po zerwaniu, a L_0 to długość pomiarowa próbki przed zerwaniem. Powyższe wymiary zostały zmierzone za pomocą projektora pomiarowego.



Rys. 43. Widok projektora pomiarowego a), próbki na wyświetlaczu projektora z zaznaczonymi miejscami wykonania pomiaru przekroju poprzecznego (1, 2) b) oraz widok szablonu do pozycjonowania połówek próbki wytrzymałościowej c)

3.6. METODYKA BADAŃ METALOGRAFICZNYCH ZŁĄCZ SPAWANYCH

Badania metalograficzne przeprowadzono w zakresie mikroskopii optycznej dokonując oceny zglądów złączy spawanych. Zglądy przeszlifowano na automatycznej szlifierko-polerce TEGRAMIN-25 firmy STRUERS. Początkowo próbki szlifowano, a następnie polerowano

stosując zawiesiny diamentowe o kolejno malejącej granulacji: 9, 6, 3, 1 μm . W końcowym etapie polerowania powierzchni zglądów użyto zawiesiny tlenku krzemu (OPS). Badania mikrostruktury próbek przeprowadzono przy użyciu mikroskopu metalograficznego firmy OLYMPUS typ PMG3 oraz Keyence VHX-6000. W celu zobrazowania mikrostruktury stali zglądy trawiono Nitaliem (2% roztwór kwasu azotowego w alkoholu etylowym).

Przygotowanie zglądów metalograficznych oraz wykonanie zdjęć struktur złącz spawanych laserowo zostały zrealizowane przez Panią dr inż. Katarzynę Makowską z Zakładu Technologii i Eksploatacji Uzbrojenia WAT.

3.7. METODYKA POMIARU MIKROTWARDOŚCI

Pomiar rozkładu mikrotwardości wykonano za pomocą metody Vickers'a stosując twardościomierz automatyczny Qness 10 CHD Master (rys. 44). Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2018. Podczas badań użyto obciążenia o masie 300 g, czas zagłębienia wynosił 15 s, a odległości pomiędzy kolejnymi odciskami wynosiły 150 μm .



Rys. 44. Widok automatycznego mikrotwardościomierza Qness 10 CHD.

3.8. METODYKA BADAŃ NIENISZCZĄCYCH ZŁĄCZ SPAWANYCH

W celu identyfikacji niezgodności spawalniczych w połączeniach spawanych wykonywano badania magnetyczno-proszkowe (MT). Badanie polegało na oczyszczeniu powierzchni blach (rys. 45a) za pomocą zmywacza MR71LS (rys. 45b), a następnie po

10-minutowym okresie schnięcia powierzchni наносzono w okolice złącza spawanego kontrastowy podkład koloru białego w postaci aerozolu MR72LS (rys. 45b). Magnesowanie realizowano za pomocą defektoskopu ręcznego (rys. 45c), który zapewnia namagnesowanie półfabrykatów stałym polem magnetycznym. Czarny proszek magnetyczny MR76S (rys. 45b) w postaci aerozolu наносzono na połączenie spawane przed i w trakcie procesu magnesowania w celu wykrycia defektów. Badanie prowadzono w dwóch kierunkach magnesowa, tj. prostopadłe i pod kątem 45° do spoiny na całej jej długości. Po badaniu blachy umyto zmywaczem.



Rys. 45. Widok przykładowych półfabrykatów a), zastosowanych preparatów w badaniu MT b) oraz widok defektoskopu magnetycznego podczas badania c)

Wizualną ocenę jakości połączeń spawanych dokonywano za pomocą mikroskopu optycznego Keyence VHX-6000, który przedstawiono na rys. 46. Urządzenie wykorzystano do oceny złącz spawanych zarówno w próbkach materiałowych, jak i w miniaturowych absorberach energii mechanicznej.



Rys. 46. Mikroskop optyczny Keyence VHX-6000

3.9. METODYKA BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH W ZAKRESIE QUASI-STATYCZNEGO ODKSZTAŁCENIA

Próby wytrzymałościowe w zakresie małych ($10^{-3} s^{-1}$) i średnich ($1 s^{-1}$) szybkości odkształcenia wykonano za pomocą maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion 45 (rys. 47a). Ze względu na przyjętą geometrię próbki, w badaniach wykorzystano specjalnie opracowane uchwyty mocujące próbkę materiałową (rys. 47b). Taki sam sposób mocowania zastosowano w testach wytrzymałościowych z dużymi szybkościami odkształcenia. Badania wytrzymałościowe w zakresie małych szybkości odkształcenia realizowano z prędkością przesuwu trawersy 0,02 mm/s, zaś badania w zakresie średnich szybkości odkształcenia przeprowadzono z prędkością 10 mm/s. Wszystkie badania wytrzymałościowe były realizowane w temperaturze pokojowej.

a)



b)



Rys. 47. Maszyna wytrzymałościowa MTS Criterion 45 a) oraz widok uchwytów mocujących próbkę materiałową po jej zerwaniu b)

3.10. CHARAKTERYSTYKA PROWADZENIA BADAŃ Z UŻYCIEM DZIELONEGO PRĘTA HOPKINSONA

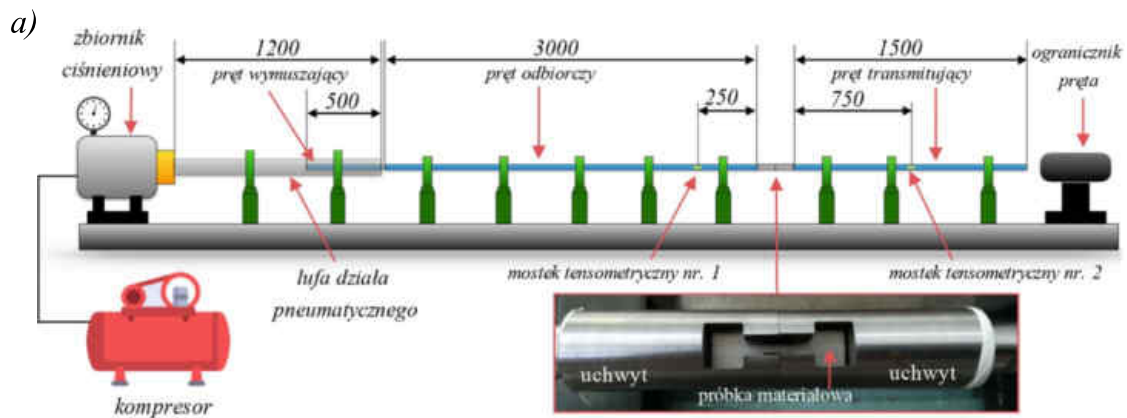
Badania wytrzymałościowe w zakresie dużych prędkości deformacji zrealizowano za pomocą stanowiska laboratoryjnego dzielonego pręta Hopkinsona, wcześniej skonfigurowanego do wariantu na rozciąganie (rys. 48). Rozwiązanie konstrukcyjne stanowiska, które zostało opracowane w ramach niniejszej pracy, nawiązuje do konstrukcji układu SHPB przedstawionego we wcześniejszym rozdziale 1.3.2 (rys. 15a). Przebieg testu dla niniejszej konfiguracji układu badawczego SHPB jest następujący: pręt wymuszający przyspieszony za pomocą pneumatycznego układu miotającego uderza w pręt odbiorczy generując ściskającą falę sprężystą, która propaguje wzdłuż pręta. Fala ta następnie przechodzi przez uchwyty i próbkę do pręta transmitującego, nie wywołując trwałej deformacji próbki

dzięki specjalnie dobranej konstrukcji uchwytów. W chwili osiągnięcia przez falę końca pręta transmisyjnego dochodzi do jej odbicia od powierzchni czołowej pręta. Powracająca fala ma charakter fali rozciągającej. Powtórne dotarcie fali do powierzchni kontaktowych próbka-uchwyt rozpoczyna proces rozciągania próbki i kończy się w chwili jej zerwania. Na podstawie profili fal rejestrowanych za pomocą tensometrycznego układu pomiarowego, tj. fali wymuszającej $\varepsilon_I(t)$, odbitej $\varepsilon_R(t)$ i transmitującej $\varepsilon_T(t)$ wykreślano dynamiczną krzywą rozciągania (naprężenie nominalne – wydłużenie całkowite) dla badanej próbki materiałowej z wykorzystaniem następujących równań:

$$\sigma_p(t) = E \frac{A_o}{A_{op}} \varepsilon_T \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}_p(t) = -\frac{2C_o}{l_o} \varepsilon_R \quad (11)$$

$$\varepsilon_p(t) = -\frac{C_o}{l_o} \int_0^t \dot{\varepsilon}_p(t) dt = -\frac{2C_o}{l_o} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (12)$$



Rys. 48. Stanowisko do testów dzielonego pręta Hopkinsona, schemat wariantu na rozciąganie z widocznymi uchwytami i próbka a) oraz rzeczywisty widok stanowiska badawczego b)

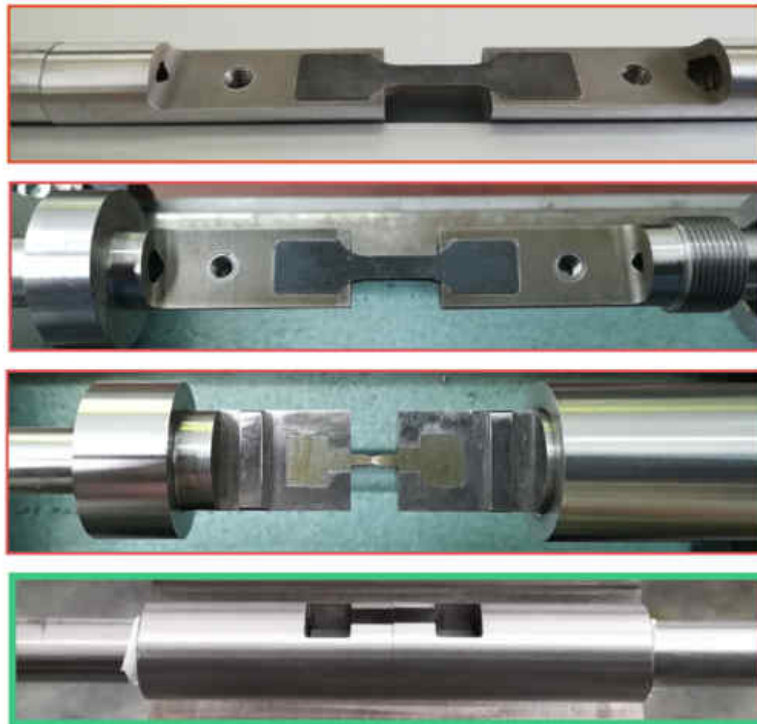
Scharakteryzowane stanowisko badawcze SHPB wyposażono w szlifowane pręty o średnicy 12 mm, wykonane ze stali C45 obrobionej cieplnie (prędkość propagacji fali dźwiękowej $C_0 = 5140$ m/s; moduł Younga $E = 207,1$ GPa). Długości prętów wymuszającego, odbiorczego i transmitującego wynosiły odpowiednio: 500, 3000 i 1500 mm. Tensometry (CEA-13-062UW-350, Vishay Micro Measurements) wchodzące w skład układu rejestrującego przebieg fal odkształcenia w prętach były naklejone na bocznych powierzchniach pręta odbiorczego i transmitującego w odległości od powierzchni kontaktowej próbka-pręt, odpowiednio 250 i 750 mm. Tensometry były podłączone w układ elektryczny pełnego mostka tensometrycznego. Ponadto, w skład tensometrycznego układu pomiarowego wchodził jeszcze wzmacniacz tensometryczny o paśmie przenoszenia 1 MHz (SGA-0B V5 firmy ESA Messtechnik) i oscyloskop cyfrowy (LeCroy WJ354A). Stanowisko SHPB wyposażono również w optoelektroniczny układ pomiaru prędkości pręta wymuszającego. Obciążenie dynamiczne próbki było natomiast realizowane za pomocą układu wymuszenia, w skład, którego wchodził gazowy układ miotający wraz ze sprężarką powietrza. Układ ten pozwala na osiągnięcie prędkości uderzenia pręta wymuszającego w przedziale od 5 do 35 m/s. W celu ograniczenia oscylacyjnych zaburzeń na profilach krzywych rozciągania zastosowano wkładki formujące falę obciążenia (*ang. Pulse Wave Shaper*). Wkładki miały kształt dysku o średnicy 3 mm, grubości 0,2 mm i były wycinane z blachy miedzianej.

Istotnym elementem opisywanego stanowiska SHPB ze względu na poprawność funkcjonowania całego układu badawczego, jak i jakości rejestrowanych sygnałów jest system mocowania próbek materiałowych. Do mocowania zastosowano specjalnie zaprojektowane uchwyty, które przedstawiono na rys. 48a, rys. 49 oraz rys. 50. W tym miejscu należy podkreślić, że przedstawione na ww. rysunkach rozwiązanie konstrukcyjne uchwytów jest rezultatem czasochłonnych prac projektowo-badawczych i wymagało przebadania kilku alternatywnych wariantów uchwytów. Na rys. 49 przedstawiono cztery wersje zaprojektowanych i przetestowanych uchwytów mocowania próbki pomiędzy prętami Hopkinsona. Czerwoną ramką zaznaczono konfiguracje uchwytów, które były kolejnymi etapami rozwoju końcowej wersji mocowań, zaznaczonych zieloną linią (rys. 49). Najistotniejszą różnicą pomiędzy prezentowanymi konstrukcjami uchwytów jest ilość części składowych. Końcowa wersja składa się jedynie z dwóch elementów, dokładnie wykonanych i spasowanych z powierzchniami części chwytowych próbki. Uchwyty posiadają otwory

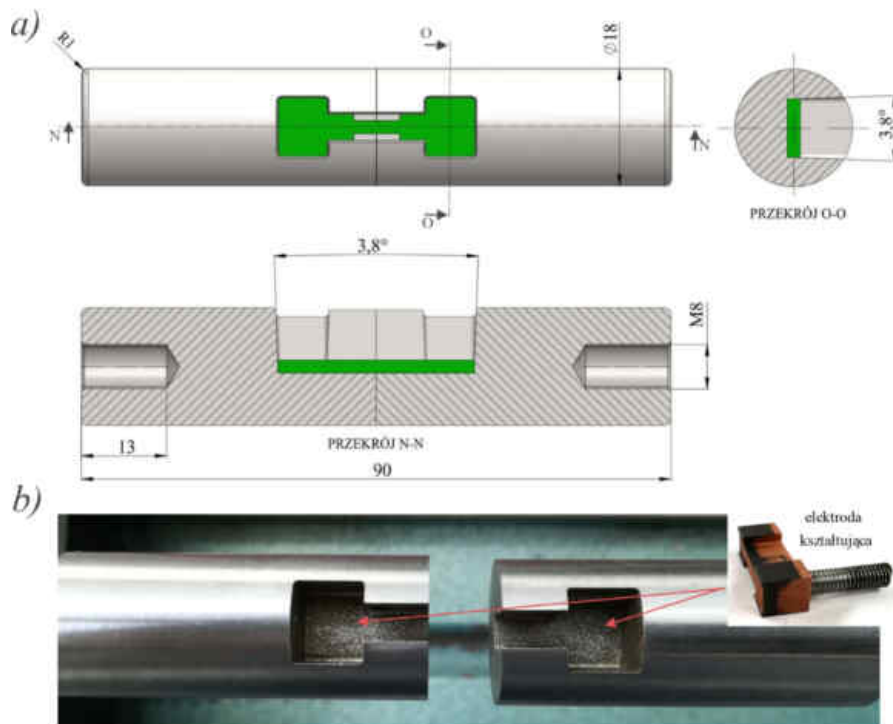
gwintowane, które umożliwiają ich montaż do prętów. Kształt gniazda montażowego próbki w uchwytach uwzględnia wyprzedzenia kątowe, umożliwiające minimalizowanie luzów podczas montażu próbki w uchwycie, a także luzu na czołowych powierzchniach uchwytów. Podczas montażu uchwytów do prętów, zastosowano taśmę teflonową do uszczelniania połączeń gwintowanych.

Dzięki prostocie konstrukcji uchwytów i dokładności ich wykonania, rejestrowane sygnały fal były najmniej zniekształcone przez zaburzenia powstające podczas kolejnych przejść fali sprężystej przez uchwyty i próbkę. Oczekiwana dokładność wykonania uchwytów wymagała zastosowania technologii drążenia elektroerozyjnego elektrodami kształtowymi, które zostały zaprojektowane i wykonane w ramach realizacji niniejszej pracy (rys. 50).

Uchwyty w wersji końcowej wykonano z materiału o zbliżonych parametrach wytrzymałościowych do materiału prętów. Obróbkę uchwytów wykonano za pomocą 5-osiowego centrum obróbczego, dzięki któremu wstępnie wyfrezowano gniazdo mocującą próbkę oraz otwory gwintowane. Następnie uchwyt w postaci jednego elementu przeszlifowano uzyskując wymaganą dokładność geometrii oraz założoną wartość chropowatości powierzchni ($R_a = 0,2\mu\text{m}$). W kolejnej operacji uchwyt rozcięto na dwie części za pomocą elektroerozyjnej przecinarki drutowej. Ostatnim etapem procesu wytwórczego uchwytów była obróbka wykończeniowa gniazd mocujących próbkę. Etap ten zrealizowano za pomocą elektrodrążarki wgłębnej, stosując dwa typy elektrod (do obróbki zgrubnej i wykończającej) wykonane z miedzi elektrodowej M1E ukształtowanych za pomocą frezerskiego centrum obróbczego.



Rys. 49. Widok czterech wersji uchwytów mocujących próbkę podczas testu Hopkinsona na rozciąganie (czerwoną ramką zaznaczono wersje rozwojowe uchwytów, zaś zieloną ramką końcową wersję)



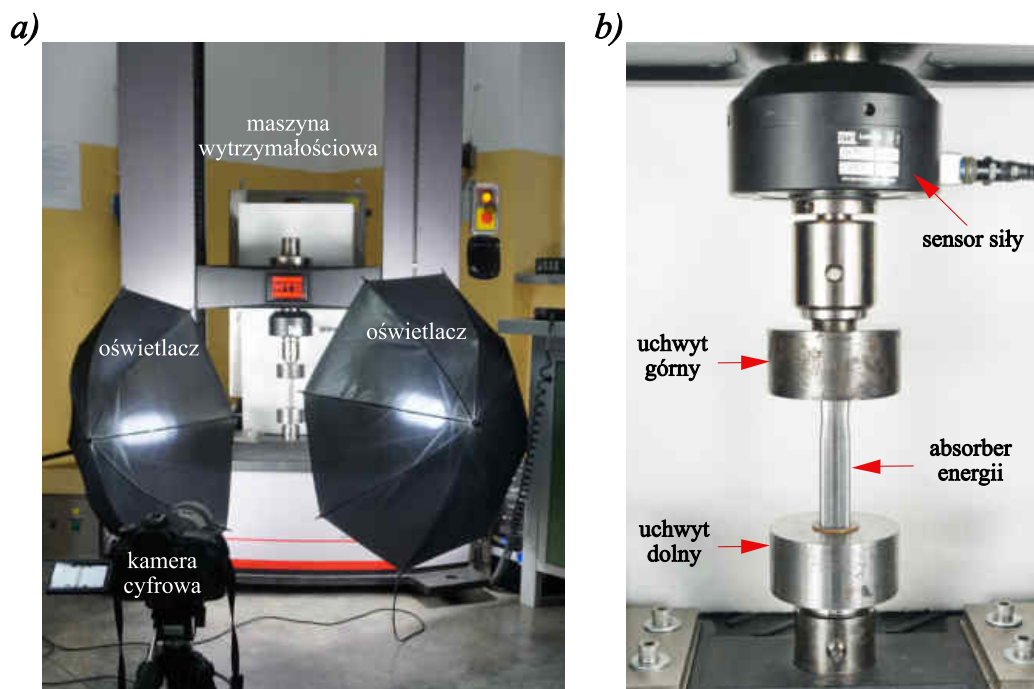
Rys. 50. Geometria układu mocującego próbkę materiałową podczas testu Hopkinsona na rozciąganie a) oraz widok uchwytów i elektrody wykończeniowej b) (kolorem zielonym zaznaczono próbkę materiałową)

3.11. METODYKA BADAŃ MINIATUROWYCH ABSORBERÓW ENERGII MECHANICZNEJ

Badania miniaturowych absorberów energii mechanicznej przeprowadzono w warunkach quasi-statycznego i dynamicznego obciążenia zgniatającego. Badania przeprowadzono w Zakładzie Technologii i Eksploatacji Uzbrojenia, Instytutu Techniki Uzbrojenia, Wojskowej Akademii Technicznej.

3.11.1. Badania absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia quasi-statycznego

Testy zgniatania absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia quasi-statycznego przeprowadzono w temperaturze pokojowej z użyciem elektromechanicznej maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C45 (rys. 51). Proces zgniatania absorberów realizowano ze stałą prędkością przesuwu trawersy wynoszącą 0,0005 m/s. Test przerywano, gdy przemieszczenie trawersy osiągało wartość 75 mm. Proces zgniatania absorberów rejestrowano dodatkowo za pomocą kamery cyfrowej z zastosowaniem dodatkowych oświetlaczy umożliwiających uzyskanie wysokiej jakości rejestrowanych filmów.



Rys. 51. Widok stanowiska badawczego do quasi-statycznego zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej a) oraz widok uchwytów z zamontowanym między nimi miniaturowym absorberem energii mechanicznej b)

3.11.2. Badania absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia dynamicznego

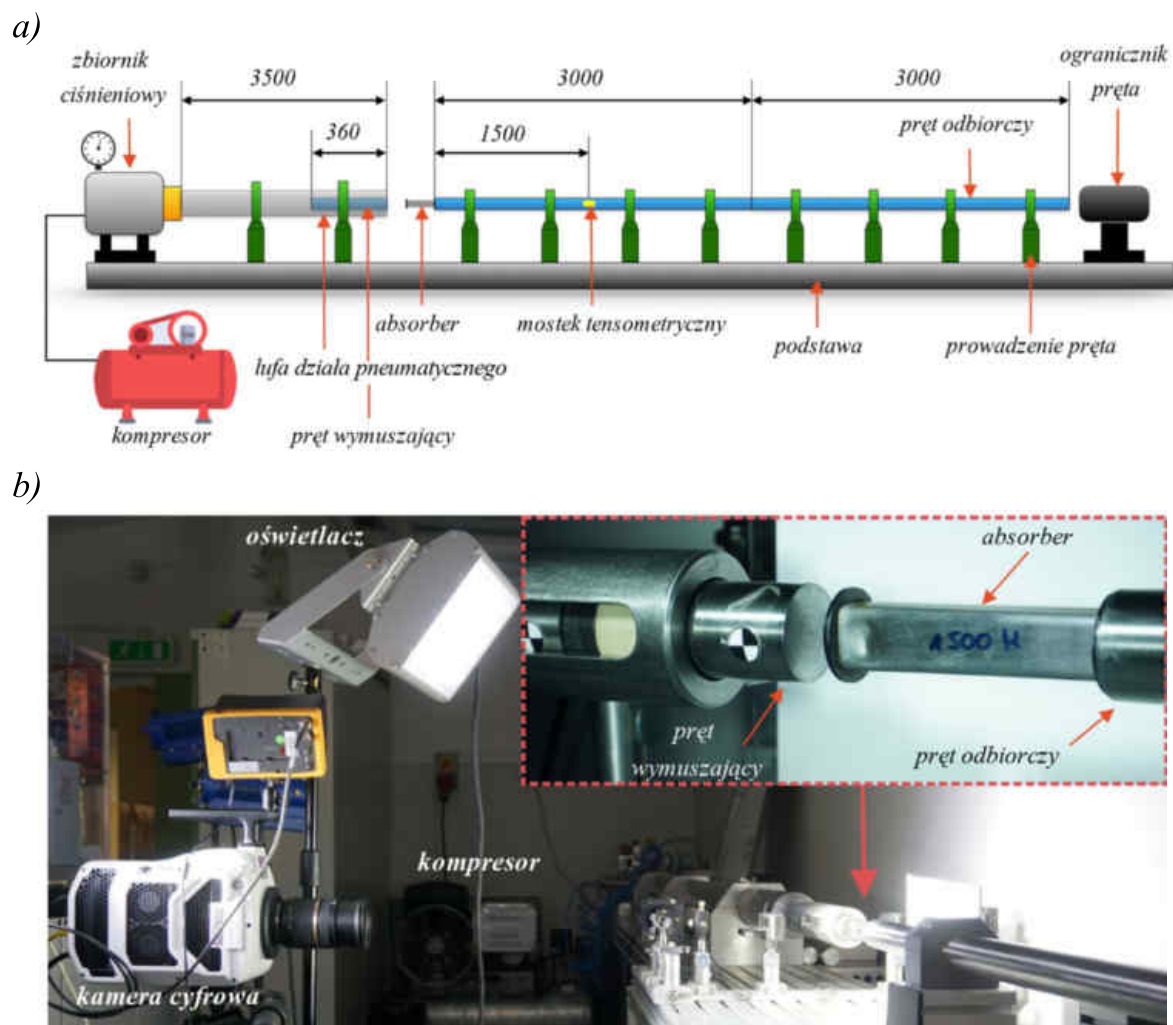
Badania w warunkach dużych prędkości deformacji przeprowadzono za pomocą zmodyfikowanej konfiguracji dzielonego pręta Hopkinsona, nazywanej w skrócie konfiguracją „bezpośredniego uderzenia” (*ang. Direct Impact Hopkinson - DIH*) (rys. 52). Stanowisko badawcze składa się z prętów o średnicy 40 mm wykonanych ze stali C40. W zastosowanej konfiguracji stanowiska badawczego wykorzystano pręt wymuszający o długości 360 mm oraz pręt odbiorczy składający się z dwóch odcinków o łącznej długości 6000 mm. Próbkę w postaci miniaturowego absorbera energii przyklejono za pomocą kleju Loctite do czoła pręta odbiorczego (rys. 52b). Prędkość pręta wymuszającego uderzającego bezpośrednio w próbkę, wynosiła ok. 29 m/s. Do napędzania pręta wykorzystywano dodatkowy pneumatyczny układ miotający. Podczas procesu zgniatania absorbera rejestrowano propagującą się w pręcie odbiorczym falę za pomocą tensometrycznego układu pomiarowego, opisanego wcześniej w rozdziale 3.10. Na podstawie rejestrowanych sygnałów pomiarowych wykreślano krzywą siły zgniatania w czasie $F(t)$ z wykorzystaniem zależności (13):

$$F(t) = EA_0\varepsilon(t) \quad (13)$$

gdzie E oznacza moduł Younga materiału, z którego wykonano pręty, A_0 to przekrój poprzeczny pręta, a $\varepsilon(t)$ to sygnał przebiegu fali w pręcie odbiorczym.

Skrócenie absorbera $d(t)$ określano na podstawie analizy filmu rejestrowanego za pomocą kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych (Phantom v1612). Zastosowano następujące parametry rejestracji: rozdzielczość 512 x 256 dpi; częstotliwość zapisu - 95000 klatek na sekundę; czas ekspozycji 5 μ s. Krzywą skrócenia $d(t)$ wyznaczano za pomocą specjalistycznego oprogramowania Tema Motion 2D przeznaczonego do analiz ruchu obiektów zarejestrowanych na nagraniach wideo.

W końcowym etapie opracowywania wyników badań dynamicznych wykreślano krzywą zgniatania absorbera $F(d)$ stosując operację rugowania czasu z wcześniej wyznaczonych zależności $F(t)$ i $d(t)$. Do tych czynności wykorzystano procedurę obliczeniową opracowaną w środowisku Mathcad 15 przez pracowników naukowych Zakładu Technologii i Eksploatacji Uzbrojenia WAT.



Rys. 52. Stanowisko Hopkinsona w konfiguracji „bezpośredniego uderzenia”: a) schemat stanowiska;
b) widok stanowiska z zamocowanym absorberem i kamerą cyfrową Phantom v1612

ROZDZIAŁ 4

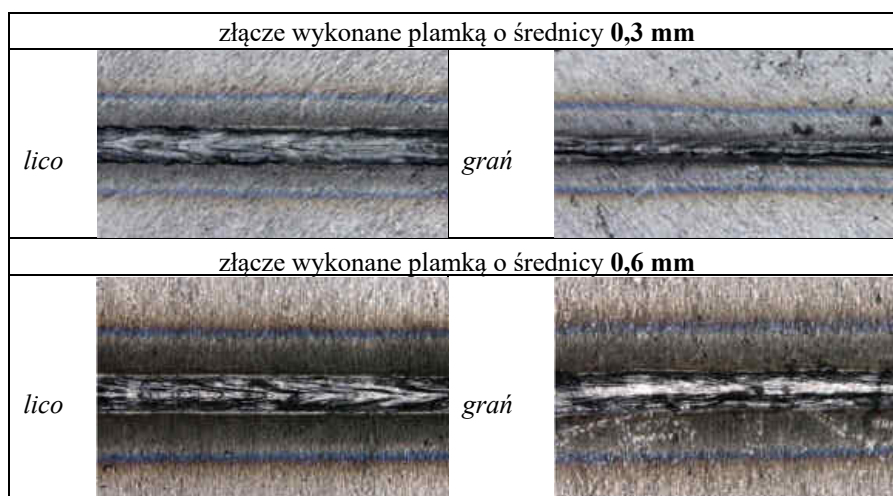
WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

W rozdziale przedstawiono wyniki wszystkich zrealizowanych badań złączy spawanych wykonanych w 2 mm blachach ze stali Strenx S700MC, Docol 800DP, Docol 1000DP, Docol 1200M i Docol 1500M. W kolejnych podrozdziałach dla każdego gatunku stali zestawiono wyniki wizualnej oceny jakości połączeń spawanych, wyniki badań metalograficznych struktury połączenia spawanego, wyniki pomiaru rozkładu twardości oraz wyniki testów wytrzymałościowych w warunkach quasi-statycznego i dynamicznego rozciągania.

4.1. BADANIA STALI STRENX S700MC

4.1.1. Wizualna ocena jakości złącza spawanego

Na rys. 53 przedstawiono widoki lica i grani poszczególnych wariantów złączy spawanych w stali Strenx S700MC wykonanych wiązkami laserowymi o różnych średnicach plamki procesowej, tj. 0,3 mm i 0,6 mm. W obu wariantach zaobserwowano różnicę pomiędzy szerokością lica i grani, która bardziej widoczna była w przypadku złącza spawanego mniejszą plamką procesową. Występujące, pojedyncze rozpryski spawalnicze są jedynie zanieczyszczeniami, które można usunąć ręcznie bez użycia dodatkowych narzędzi. W obu wariantach złączy spawanych nie zaobserwowano pęknięć, nieciągłości ani braku przetopienia.



Rys. 53. Widoki profili lica i grani złączy spawanych laserowo ze stali Strenx S700MC, dla dwóch średnic plamek procesowych – 0,3 i 0,6 mm

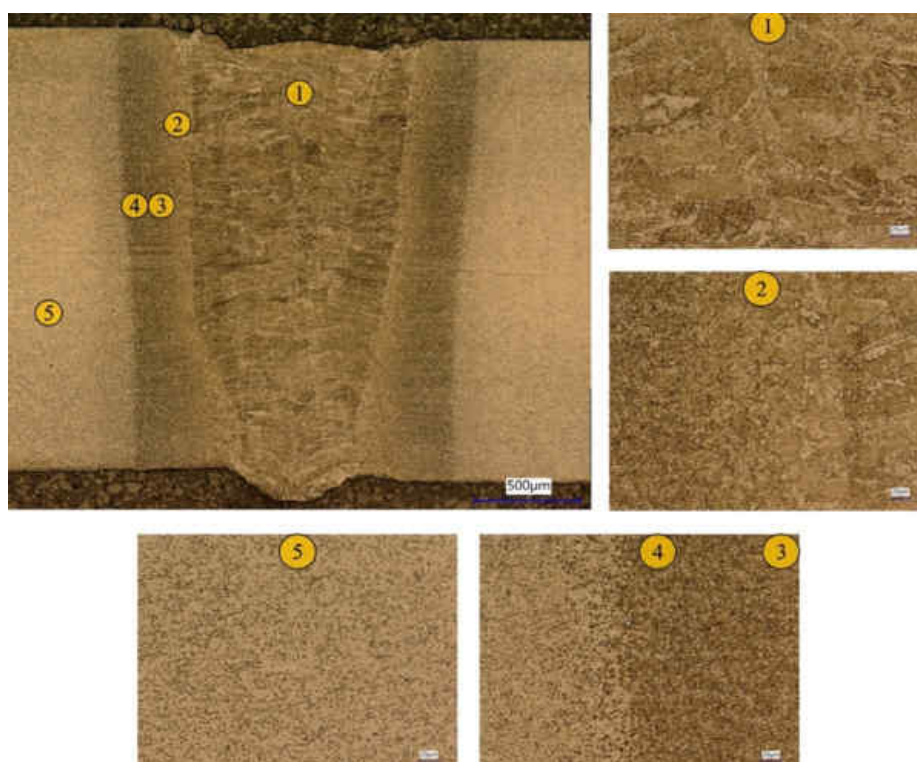
4.1.2. Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego

Na rys. 54 i rys. 55 przedstawiono zdjęcia przekrojów złącz spawanych oraz zdjęcia mikrostruktury poszczególnych stref (strefy charakterystyczne przedstawiono w tab. 7), wykonanych w blachach ze stali Strenx S700MC płamką procesową odpowiednio o średnicy 0,3 mm i 0,6 mm. Dla obydwu wariantów spawania zaobserwowano podobny rodzaj mikrostruktury poszczególnych stref złącza spawanego. Strefa wtopienia posiada zróżnicowaną strukturę, w jej obszarze stwierdzono występowanie bainitu (B), ferrytu allotriomorficznego (α_{af} – „allotriomorphic ferrite”), ferrytu drobnoziarnistego (α_{ac} – „acicular ferrite”), a także występującego miejscowo ferrytu Widmanstättena (α_{wf} – „Widmanstatten ferrite”) oraz pojedynczych wydzieli ferrytu poligonalnego (α_{pf} – „polygonal ferrite”). Dla obu wariantów złącz spawanych zaobserwowano, że strefa wpływu ciepła charakteryzuje się strukturą podobną do materiału rodzimego (struktura ferrytyczno-bainityczna), jest ona jednak znacznie bardziej drobnoziarnista w porównaniu do strefy wtopienia. Ponadto, strefa wpływu ciepła jest również pozbawiona kierunkowości na skutek procesu rekrytalizacji.

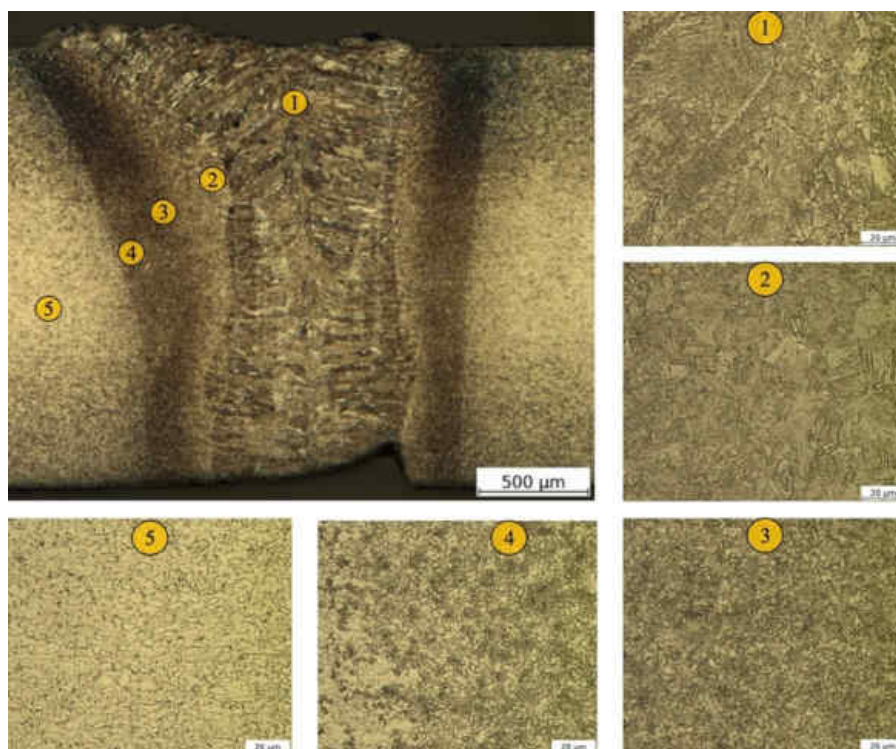
W przypadku spawania wiązką laserową o średnicy 0,3 mm (rys. 54) zaobserwowano zmienną szerokość spoiny zmniejszającą się w stronę grani, a także niepełne wypełnienie lica oraz wyciek grani. Zgodnie z normą PN-EN ISO 13919-1 złącze spełnia wymagania poziomu jakości B. Z kolei dla złącza wykonanego płamką o średnicy 0,6 mm widoczna jest znaczna asymetria spoiny, głównie od strony grani. Zaobserwować można także jednostronne wklęsnięcie grani oraz jednostronny nadlew lica. Wyżej opisane połączenie spawane (rys. 55) spełnia wymagania klasy jakości D (wymagania łagodne).

Tab. 7. Oznaczenie stref charakterystycznych złącza spawanego

Symbol	Skrót	Opis
1 1'	FZ (<i>ang. Fusion Zone</i>)	strefa wtopienia
2 2'	CGHAZ (<i>ang. Coarse Grain Heat Affected Zone</i>)	gruboziarnista strefa wpływu ciepła (SWC)
3 3'	FGHAZ (<i>ang. Fine Grain Heat Affected Zone</i>)	drobnoziarnista strefa wpływu ciepła (SWC)
4 4'	ICHAZ (<i>ang. Inter-Critical Heat-Affected Zone</i>)	strefa nagrzewania między temperaturami Ac1-Ac3
5	BM (<i>ang. Base Material</i>)	materiał rodzimy (MR)



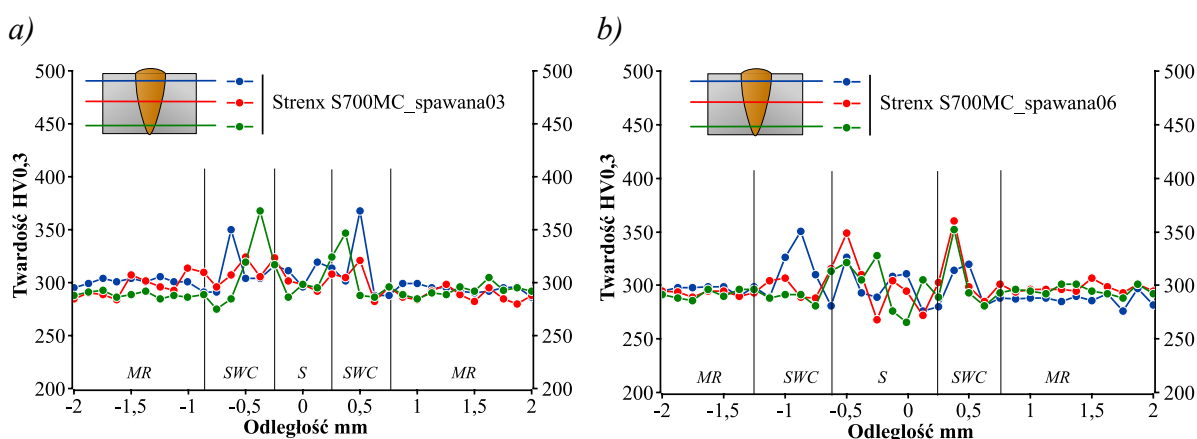
Rys. 54. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Strenx S700MC wykonanego wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,3 mm



Rys. 55. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Strenx S700MC wykonanego wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,6 mm.

4.1.3. Rozkład mikrotwardości wykonanych złączy spawanych

Na rys. 56 przedstawiono rozkłady mikrotwardości złączy w stali Strenx S700MC spawanych laserowo wiązką o średnicy plamki procesowej 0,3 mm (rys. 56a) i 0,6 mm (rys. 56b). Pomiary twardości wykonano wzdłuż trzech linii poprowadzonych w połowie grubości blachy, 0,25 mm od powierzchni blachy, od strony grani oraz 0,25 mm od powierzchni blachy od strony lica. W przypadku złącza spawanego wykonanego plamką 0,3 mm (rys. 56a) stwierdzono, że twardość spoiny wynosząca średnio 298 HV jest zbliżona do twardości materiału rodzimego. Twardość w SWC była natomiast zróżnicowana, tj. na granicy strefy wtopienia zaobserwowano wzrost twardości do wartości 368 HV, a następnie jej spadek do poziomu materiału rodzimego wynoszącego – 295 HV. W przypadku złącza spawanego wykonanego wiązką o średnicy plamki 0,6 mm (rys. 56b) najniższa twardość w strefie wtopienia wyniosła 265 HV. W SWC charakter rozkładu twardości był podobny do rozkładu stwierdzonego w połączeniu wykonanych wiązką 0,3 mm, tj. wzrost twardości do wartości 350 HV w drobnoziarnistej SWC, a następnie spadek w gruboziarnistej SWC do twardości materiału rodzimego. Główną różnicą jaką można zaobserwować pomiędzy ww. opisanymi rozkładami twardości jest szerszy zakres podwyższonej twardości odpowiadający szerokości spoiny i SWC oraz jej asymetryczność, która prawdopodobnie wynikała z uszkodzenia górnej krawędzi spawanego półfabrykatu podczas operacji cięcia.

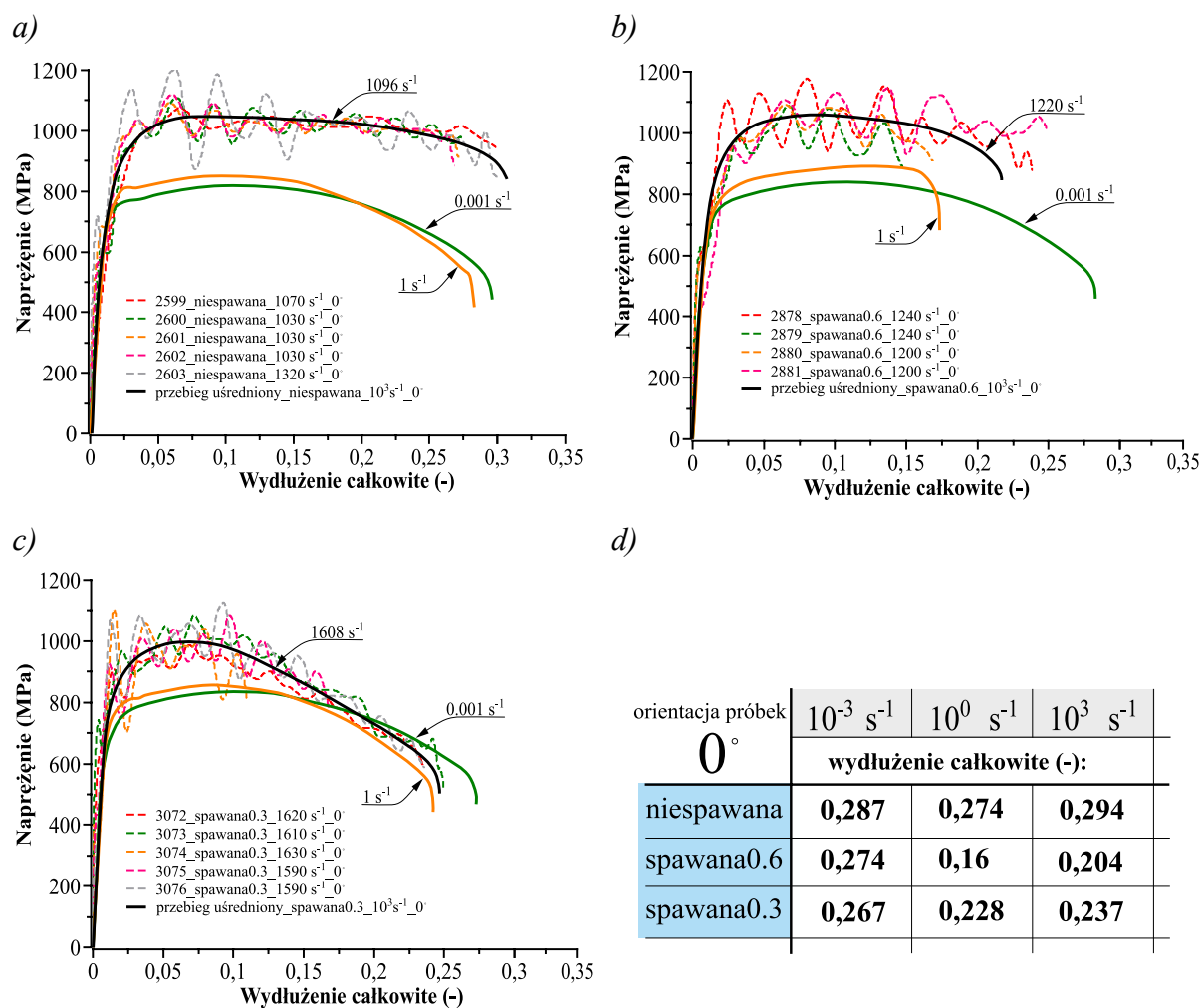


Rys. 56. Rozkłady mikrotwardości złączy wykonanych ze stali Strenx S700MC: a) spawanych laserowo plamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) oraz 0,6 mm

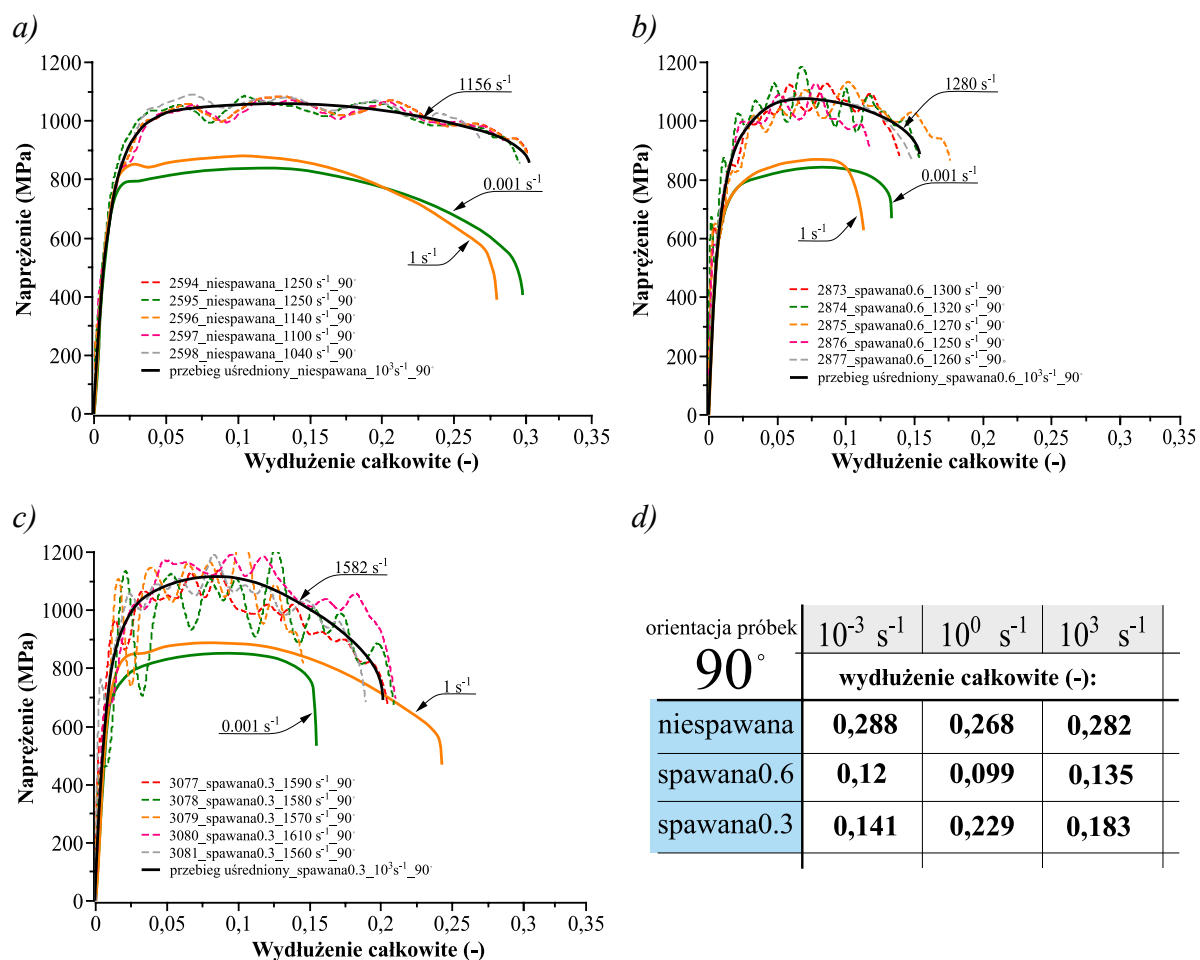
4.1.4. Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Strenx S700MC

Krzywe rozciągania podzielono ze względu na kierunek wycinania próbek i przedstawiono je odpowiednio dla próbek równoległych (rys. 57), prostopadłych (rys. 58) oraz zorientowanych pod kątem 45° (rys. 59) do kierunku walcowania blachy. Dla każdego kierunku wycinania próbek opracowano zestawienie krzywych quasi-statycznych i dynamicznych otrzymanych podczas testów wytrzymałościowych zarówno próbek niespawanych, jak i spawanych wiązką o średnicy 0,3 i 0,6 mm. Na rys. 57a przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie dla próbek niespawanych z małą ($0,001\text{ s}^{-1}$), średnią (1 s^{-1}) i dużą (1096 s^{-1}) szybkością odkształcenia. Porównane ze sobą krzywe odwzorowujące właściwości mechaniczne świadczą o niewielkim wzroście wytrzymałości badanej stali do poziomu około 800 MPa w przedziale szybkości odkształcenia $0,001\div 1\text{ s}^{-1}$, podczas gdy w warunkach dynamicznego obciążenia, naprężenie plastycznego płynięcia osiąga wartość powyżej 1000 MPa. Podobne wyniki wytrzymałości mechanicznej zaobserwowano dla próbek spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm (rys. 57b) i 0,3 mm (rys. 57c) dla wszystkich kierunków wycinania próbek. Stwierdzono, jednakże, że złącza spawane wiązką laserową o średnicy 0,6 mm wykazywały nieco wyższą wytrzymałość (maks. średnia wartość naprężeń maksymalnych dla kierunku 0° – wyniosła 1060 MPa), podczas gdy wartość analogicznych naprężeń maksymalnych określona dla złącz spawanych wiązką o średnicy 0,3 mm wyniosła odpowiednio - 1005 MPa.

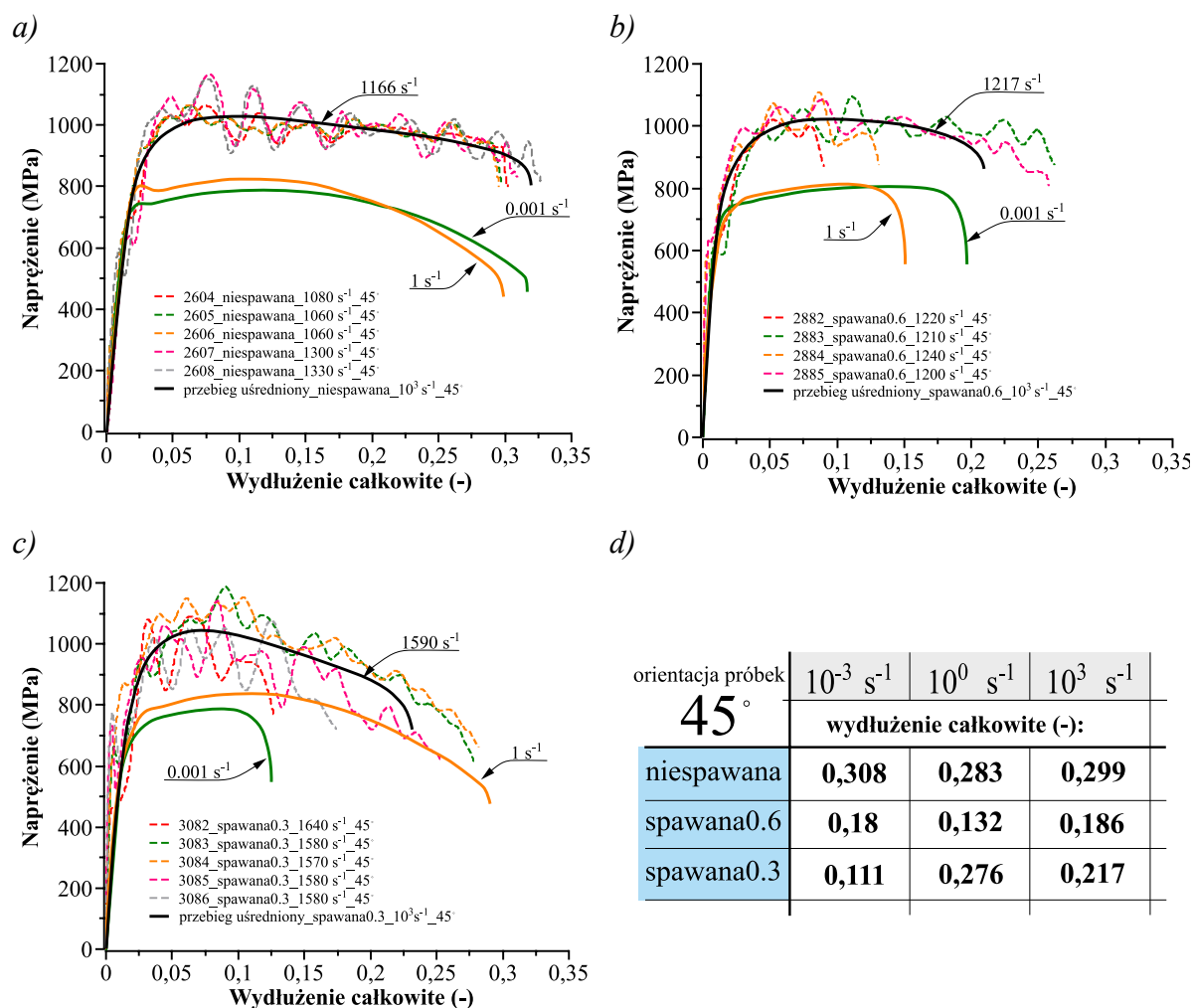
Próbki ze złączami spawanymi wykonanymi małą średnicą wiązki charakteryzowały się natomiast dobrą ciągliwością w warunkach dynamicznego odkształcenia (średnia wartość wydłużenia wyniosła – 0,24) w stosunku do ciągliwości próbek niespawanych (średnia wartość wydłużenia wyniosła – 0,3). Z kolei, ciągliwość próbek ze złączami spawanymi wiązką 0,6 mm wyniosła 0,2 w przypadku próbek o orientacji wycinania 0° i 45° , podczas gdy dla próbek o orientacji wycinania 90° , średnie wydłużenie całkowite wyniosło zaledwie 0,13. Ponadto, zaobserwowano, że krzywe rozciągania dla próbek spawanych wiązką 0,3 mm mają odmienny charakter, który wyraża się większym spadkiem wartości naprężenia plastycznego płynięcia po przekroczeniu zakresu naprężeń maksymalnych. Zależność ta jest w szczególności możliwa do zaobserwowania w przypadku krzywych uzyskanych w wyniku realizacji testów SHPB, których charakter może świadczyć o występowaniu zjawiska tzw. osłabienia odkształceniowego lub/i termicznego materiału złącza spawanego.



Rys. 57. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych równolegle (0°) względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 58. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych prostopadłe (90°) względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



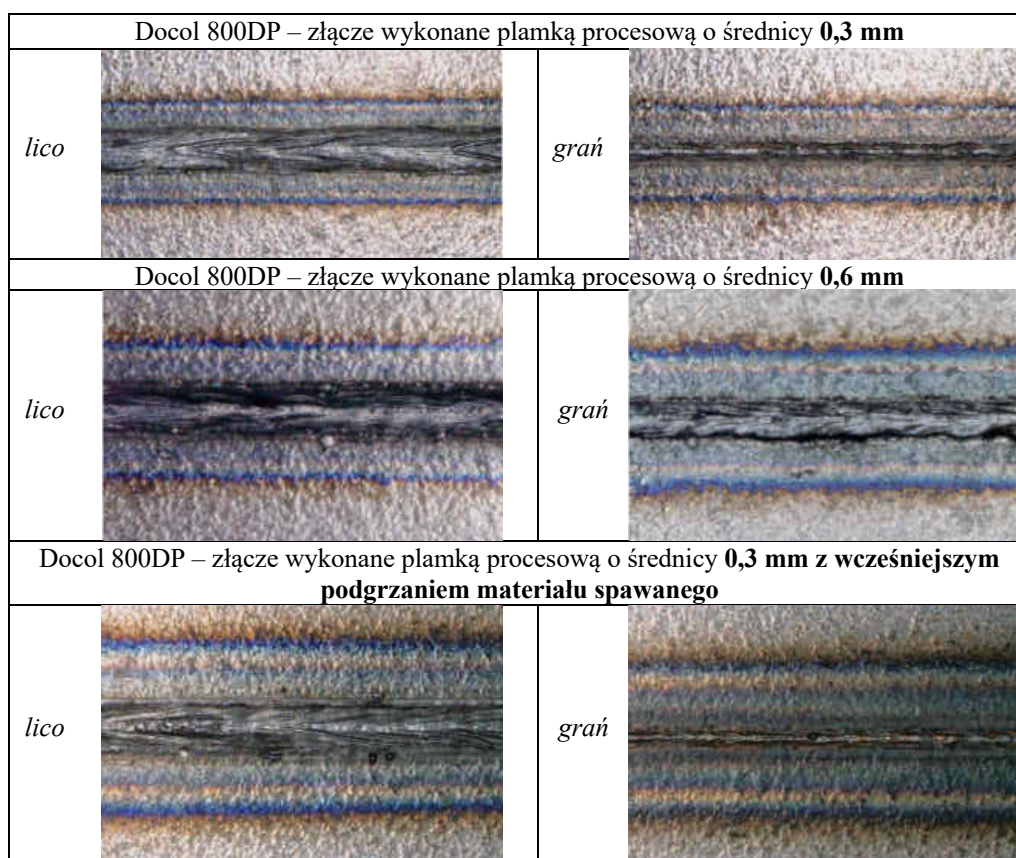
Rys. 59. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) nispawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia

4.2. BADANIA STALI DOCOL 800DP

4.2.1. Wizualna ocena jakości złącza spawanego

Na rys. 60 przedstawiono zdjęcia ilustrujące poszczególne widoki profili lica i grani próbek ze złączami spawanymi dla warunków spawania tj. spawanie wiązką o średnicy 0,3 mm, wiązką o średnicy 0,6 mm oraz wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach. Dla ww. wariantów nie zaobserwowano niezgodności spawalniczych. Analizując profile lica, najmniejszą niejednorodność spoiny zaobserwowano

w przypadku złączy spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm. Najistotniejszą różnicą pomiędzy profilem grani jest zróżnicowana szerokość spoiny oraz strefy oddziaływania cieplnego. Najmniejszą szerokość spoiny zaobserwowano dla złączy podgrzewanych przed spawaniem, największą zaś dla złączy spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm. W badanych próbkach wystąpiły rozpryski spawalnicze, ich największą ilość zauważono w wariancie ze wstępnym podgrzaniem materiału, które następnie spawano wiązką laserową o średnicy 0,3 mm.

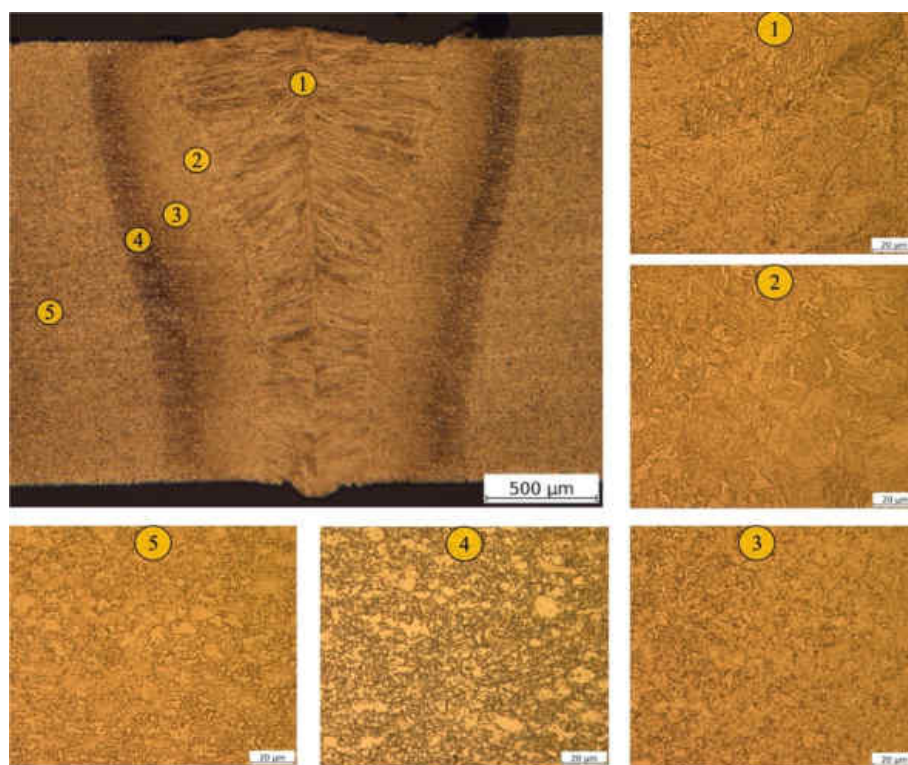


Rys. 60. Widoki profili lica i grani złączy wykonanych ze stali Docol 800DP spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, 0,6 mm oraz 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem

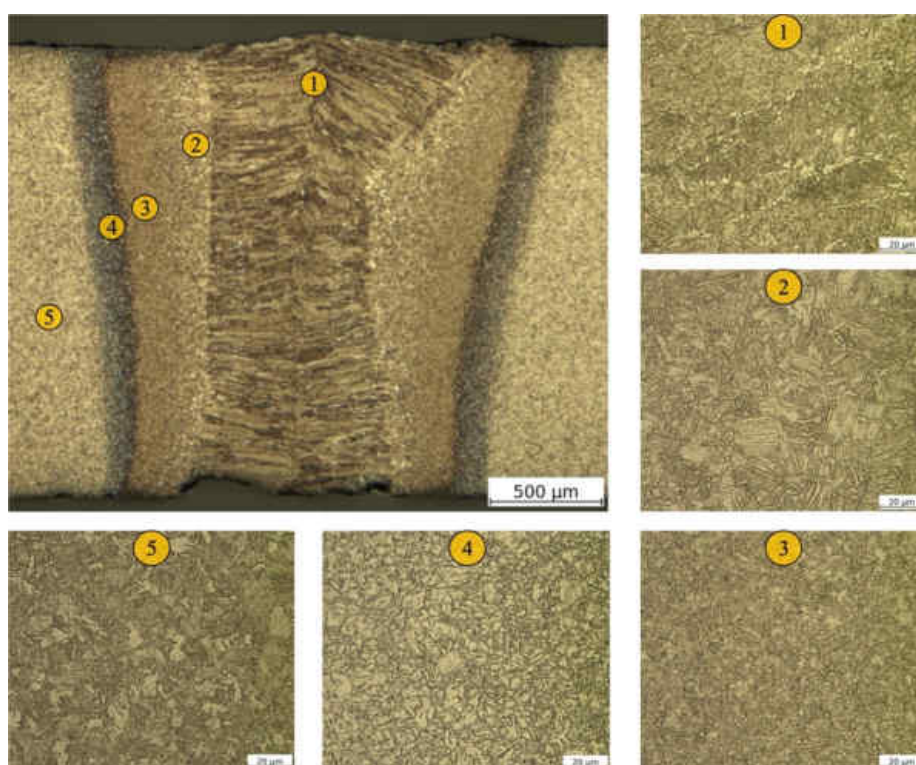
4.2.2. Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego

Wyniki badań metalograficznych spoin wykonanych dla następujących warunków spawania tj.: spawanie wiązką laserową o średnicy 0,3 mm i 0,6 mm oraz spawania wiązką o średnicy 0,3 mm i dodatkowym wygrzewaniu złącza rozogniskowaną wiązką laserową przedstawiono odpowiednio na rys. 61, rys. 62 i rys. 63. Stal Docol 800DP posiada strukturę

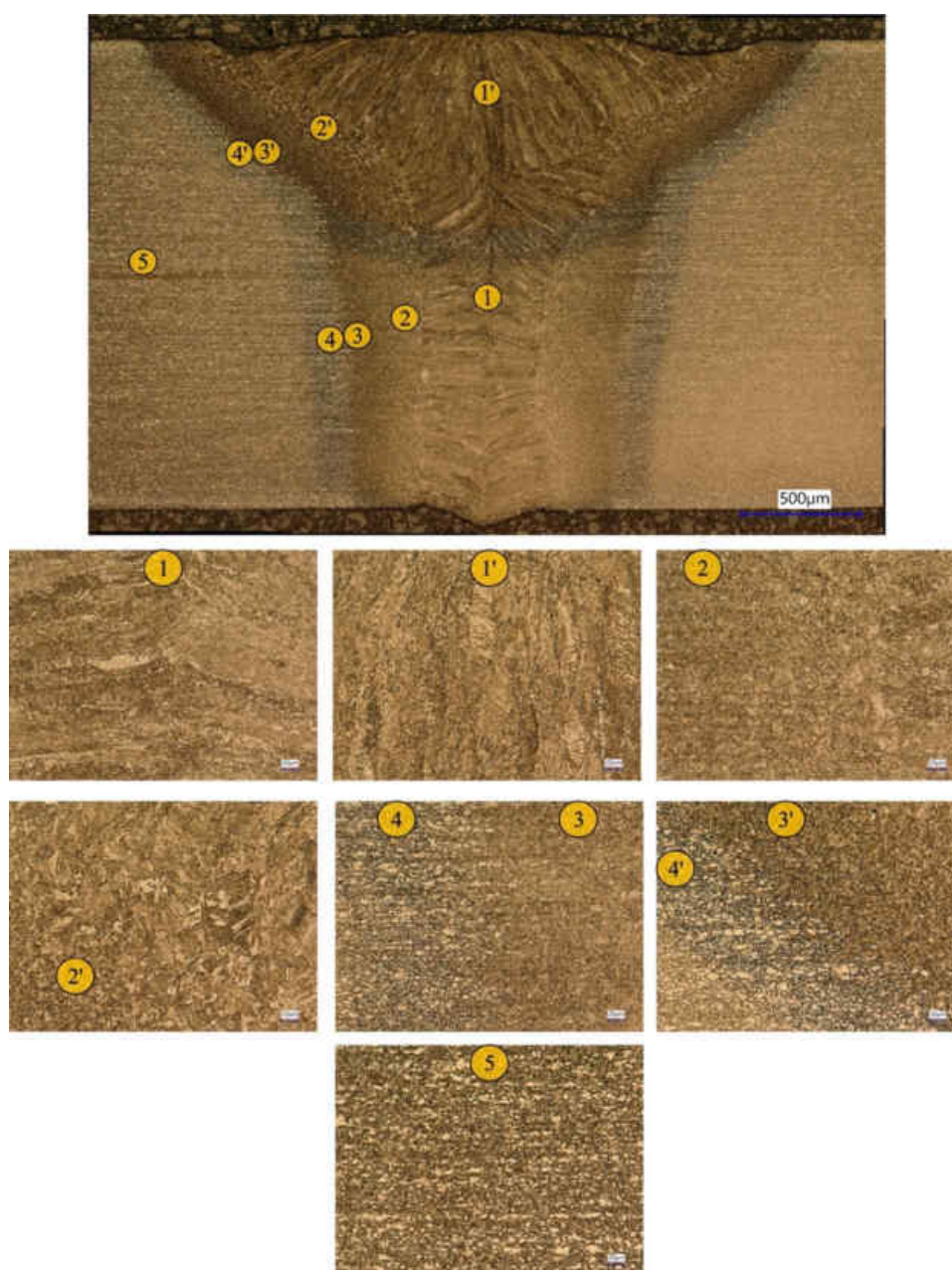
ferrytyczno-martenzytyczną, natomiast w linii wtopienia zaobserwowano powstanie mieszaniny struktury martenzytycznej i bainitycznej oraz niewielkie ilości ferrytu. Taki sam udział faz, wystąpił w strefie wpływu ciepła, tylko o stosunkowo bardziej gruboziarnistej lub drobnoziarnistej strukturze w zależności od odległości od strefy wtopienia. Ponadto, w przypadku połączenia spawanego wykonanego wiązką o średnicy 0,3 mm zaobserwowano zmienną szerokość spoiny, zmniejszającą się w stronę grani. Przyczyną powstania takiej geometrii spoiny jest spawanie wiązką o dużej gęstości energii i stosunkowo krótkim czasem oddziaływania wiązki laserowej z materiałem. Połączenie zaklasyfikowano do poziomu B. W przypadku złącza spawanego wiązką o średnicy 0,6 mm (rys. 62) zauważono, że większa szerokość spoiny od strony lica wynika prawdopodobnie z uszkodzenia krawędzi blachy przed spawaniem. Na zdjęciu złącza widoczne jest wklęsnięcie grani, jednak jego wymiar nie wykracza poza wymagania określające poziom jakości B. W przypadku złącza wygrzewanego po spawaniu (rys. 63) można zaobserwować zmienną geometrię spoiny wynikającą z wygrzewania połączenia spawanego po spawaniu. Widoczne są małe obustronne wklęsnięcia lica spoiny. Złącze to spełnia ostre wymagania jakościowe dla poziomu B.



Rys. 61. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 800DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm



Rys. 62. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 800DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm

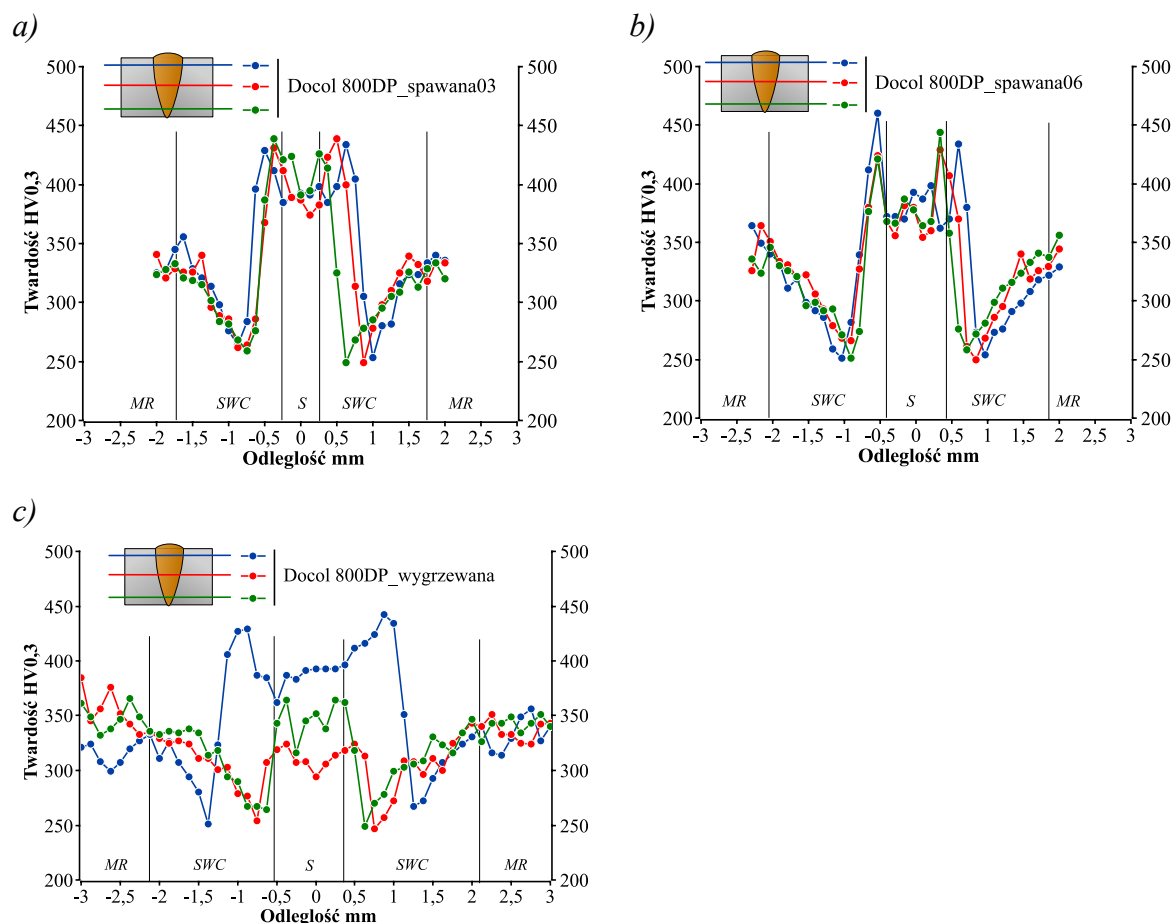


Rys. 63. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 800DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm i wygrzanego po spawaniu

4.2.3. Rozkład mikrotwardości wykonanych złącz spawanych

Rozkłady twardości złącz spawanych stali Docol 800DP przedstawiono na rys. 64. Dla złącza spawanego płamką 0,3 mm (rys. 64a) wartość twardości w strefie przetopienia wynosiła 391 HV i wzrastała do wartości - 439 HV w drobnoziarnistej SWC, a następnie malała do poziomu 260 HV w gruboziarnistej SWC. Złącze wykonane płamką o średnicy 0,6 mm

(rys. 64b) wykazywało podobny charakter zmian twardości jak w przypadku mniejszej średnicy plamki, jednak różnica zmian twardości w spoinie i SWC bezpośrednio przy spoinie była większa, a twardość wynosiła odpowiednio 375 HV oraz 460 HV. Na rys. 64c przedstawiono rozkłady twardości złącza, w którym wykorzystano dodatkowe wygrzewanie wiązką laserową po spawaniu. W złączu zaobserwowano zróżnicowaną szerokość spoiny oraz twardość w obszarze strefy wtopienia. Na linii od strony lica twardość wyniosła 383 HV, w połowie przekroju poprzecznego złącza 305 HV oraz na linii od strony grani – 338 HV. Szerokość spoiny zmniejszała się wraz ze wzrostem odległości od powierzchni lica spoiny i wynosiła odpowiednio 1,3 mm, 0,6 mm oraz 0,55 mm. Dla wszystkich trzech analizowanych stref złącza zaobserwowano znaczące zmniejszenie twardości w gruboziarnistej SWC wynoszącej ok. 250 HV.



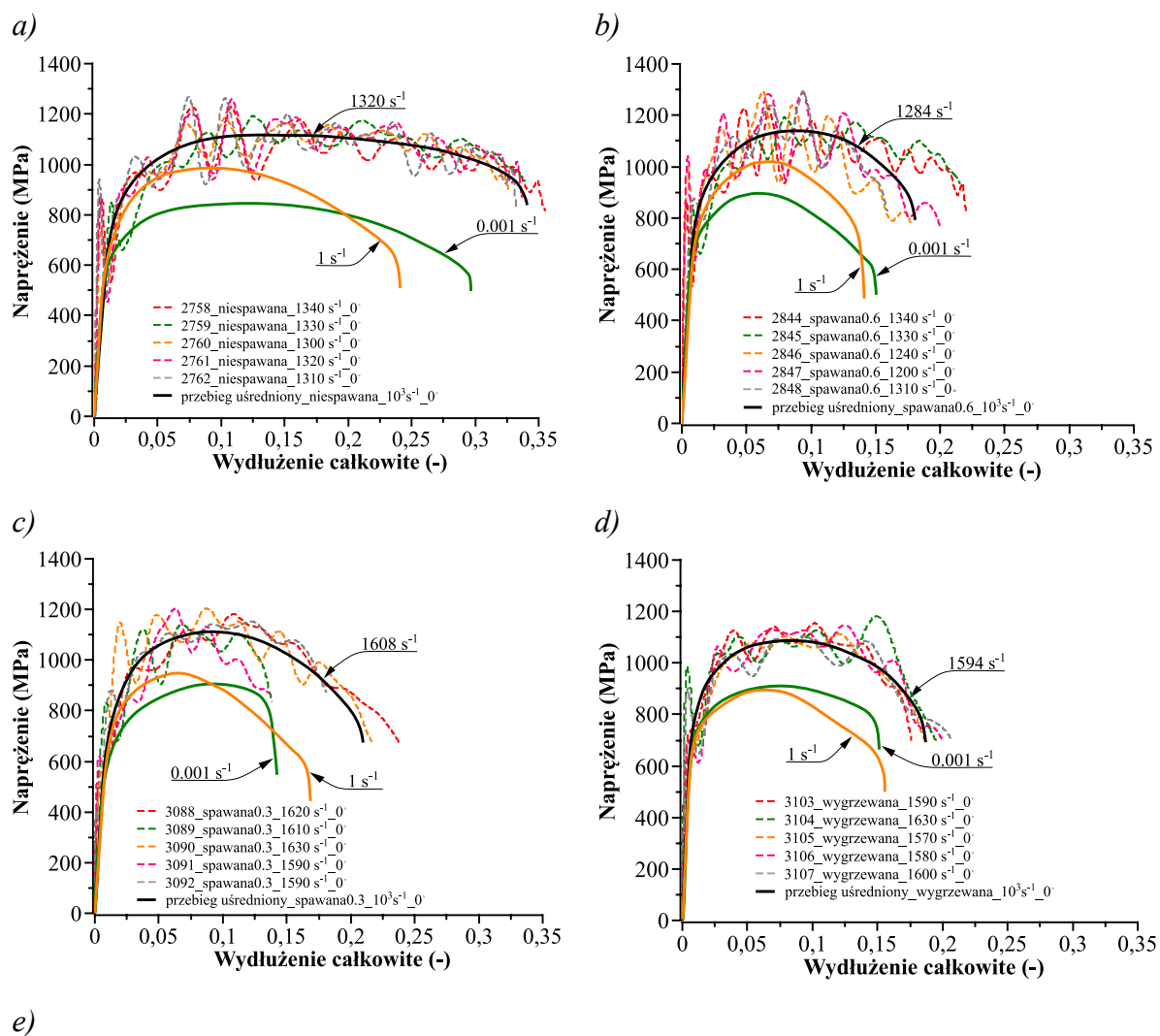
Rys. 64. Rozkłady mikrotwardości złączy wykonanych ze stali Docol 800DP: a) spawanych laserowo plamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) 0,6 mm; c) oraz 0,3 mm z wygrzaniem złącza bezpośrednio po spawaniu

4.2.4. Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 800DP

Na rysunkach rys. 65, rys. 66, rys. 67 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych stali Docol 800DP uzyskane odpowiednio dla próbek o orientacji równoległej, prostopadłej oraz ukośnej do kierunku wycinania próbek. Wyniki przedstawiono dla małego, średniego i dużego poziomu szybkości odkształcenia. W testach wykorzystano próbki niespawane oraz próbki spawane w wariantach wymienionych we wcześniejszych podrozdziałach. W przypadku próbek niespawanych (rys. 65a, rys. 66a, rys. 67a) zaobserwowano wzrost wytrzymałości w zakresie szybkości odkształcenia $0,001\div 1320\text{ s}^{-1}$, a maksymalne naprężenia plastycznego płynięcia zmieniały się w zakresie od 1100 do 1180 MPa dla badanych orientacji próbek względem kierunku ich wycinania. Podobne wnioski sformułowano również dla próbek ze złączem spawanym wiązką laserową o średnicy 0,6 mm dla orientacji 0° (rys. 65b), 90° (rys. 66b) oraz 90° (rys. 67b). W przypadku próbek ze złączami wykonanymi płamką procesową o mniejszej średnicy oraz próbek spawanych z dodatkowym procesem cieplnym po spawaniu (z wyjątkiem równoległego kierunku wycinania) zauważono jedynie nieznaczny wzrost wytrzymałości podczas testów prowadzonych w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Wyjątkiem są próbki wygrzewane po spawaniu, wycinane równolegle do kierunku walcowania (rys. 65d), w ich przypadku stwierdzono spadek wytrzymałości dla średniego poziomu szybkości odkształcenia o 20 MPa.

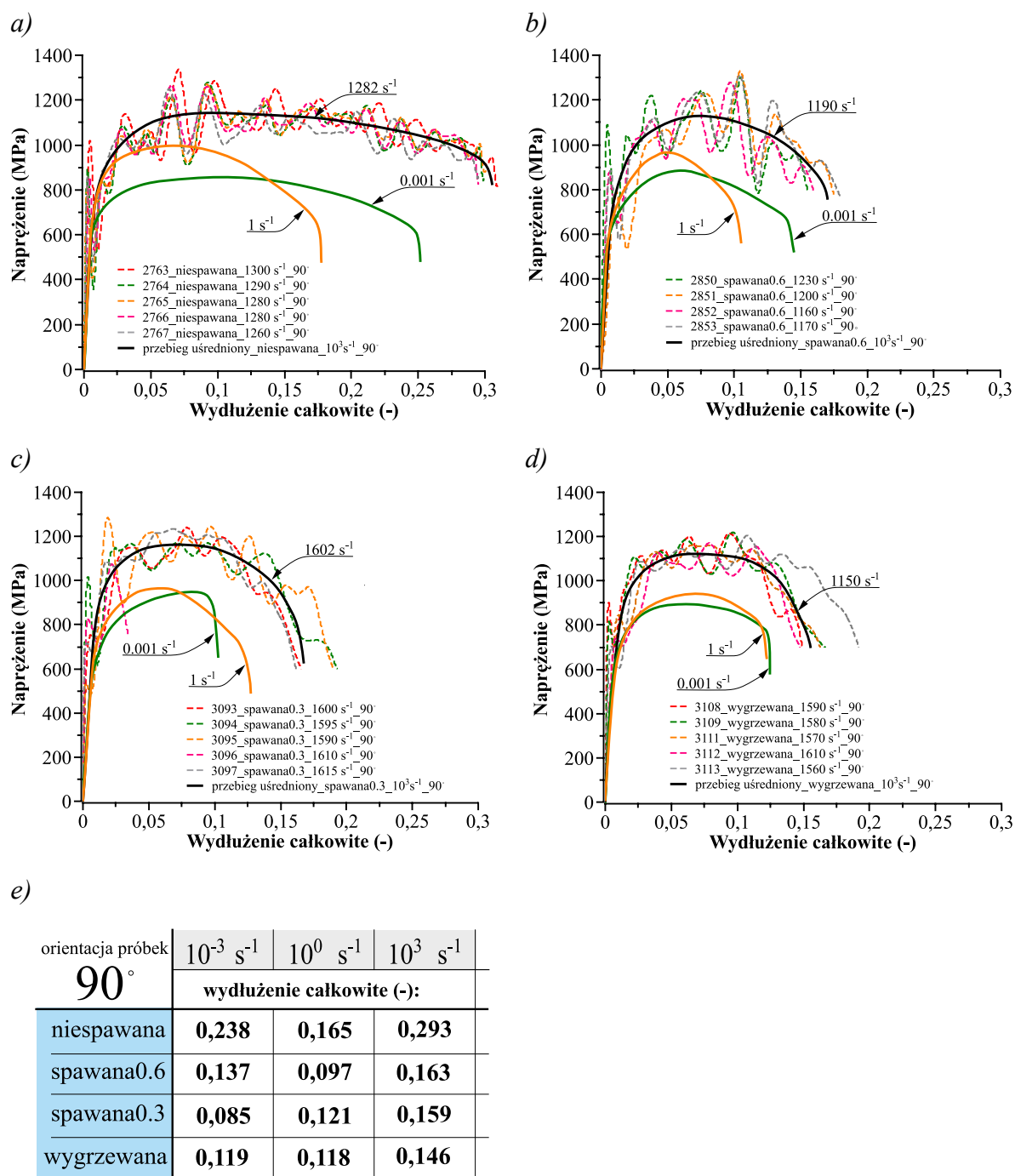
Ciągliwość próbek spawanych wiązkami laserowymi o średnicy 0,3 i 0,6 mm w warunkach obciążenia dynamicznego znacząco spadła w stosunku do ciągliwości próbek niespawanych. Najwyższe, średnie wartości wydłużeń całkowitych otrzymano dla próbek ze złączami o orientacji 45° . Uzyskane wartości wynosiły odpowiednio 0,201 i 0,198 dla złącz spawanych wiązką o średnicy 0,3 mm (rys. 67c) i 0,6 mm (rys. 67b). W przypadku próbek niespawanych i spawanych płamką procesową o średnicy 0,6 mm, stwierdzono zmniejszenie wartości wydłużenia dla średniego poziomu szybkości odkształcenia względem wyników uzyskanych w warunkach quasi-statycznych. Z kolei, w przypadku próbek spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm stwierdzono odwrotną relację, tj. średnie wydłużenie całkowite dla szybkości odkształcenia 1 s^{-1} było wyższe niż dla testów prowadzonych w warunkach quasi-statycznych i wynosiło: dla równoległego kierunku wycinania próbek - 0,16, prostopadłego - 0,12 i kierunku ukośnego - 0,13. Próbkę ze złączami wygrzewanymi po procesie spawania

wykazały zbliżone, średnie wartości wydłużenia całkowitego, które dla równoległego kierunku wycinania wyniosło 0,14 (rys. 65d), zaś dla prostopadłego 0,12 (rys. 66d).

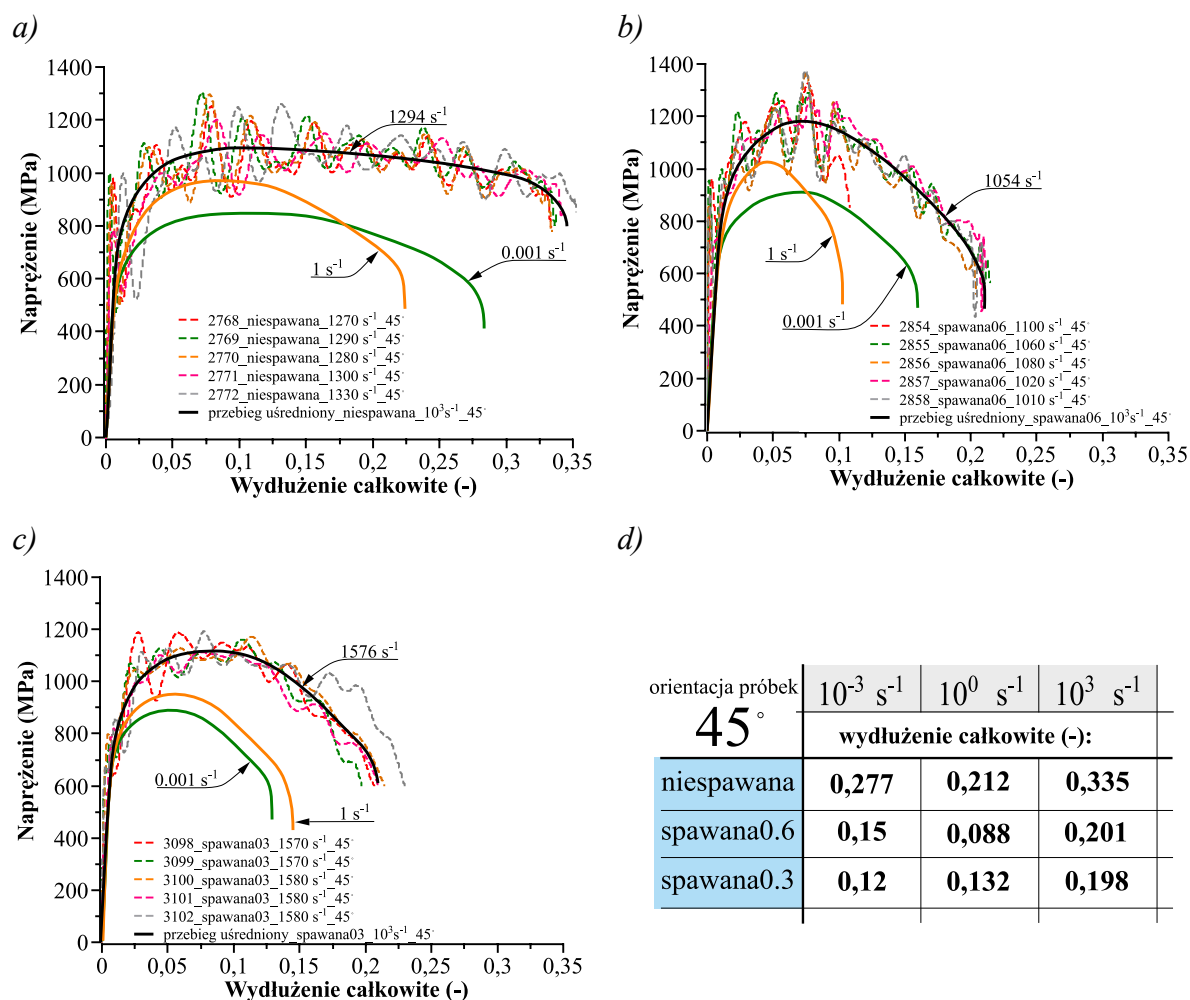


orientacja próbek 0°	10 ⁻³ s ⁻¹	10 ⁰ s ⁻¹	10 ³ s ⁻¹
	wydłużenie całkowite (-):		
niespawana	0,27	0,223	0,326
spawana0.6	0,141	0,132	0,173
spawana0.3	0,13	0,161	0,193
wygrzewana	0,134	0,143	0,178

Rys. 65. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu oraz e) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 66. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu oraz e) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 67. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) nieszpawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia

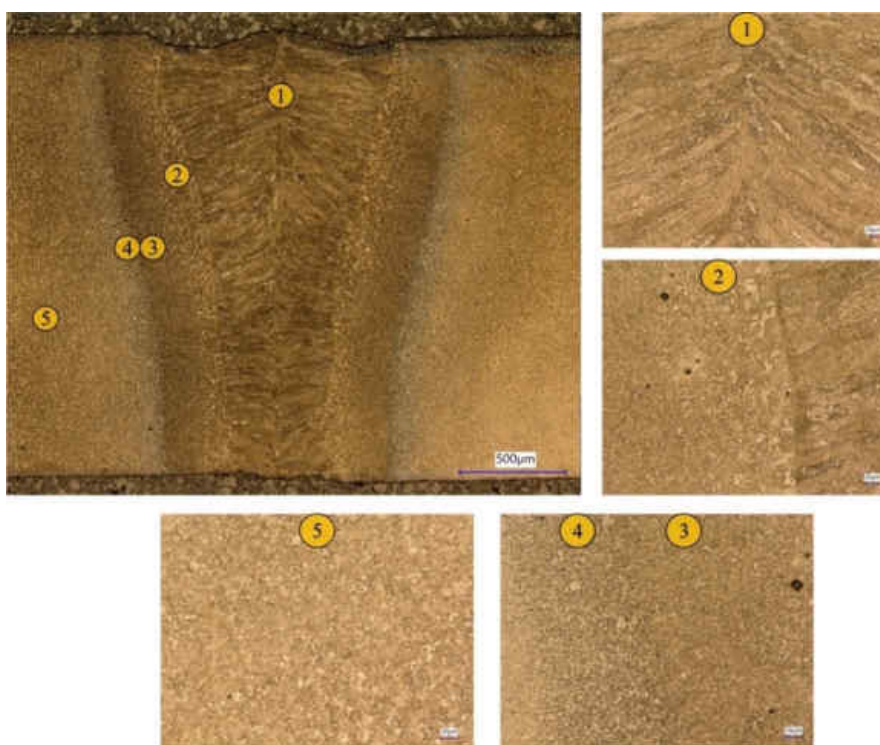
4.3. BADANIA STALI DOCOL 1000DP

4.3.1. Wizualna ocena jakości złącza spawanego

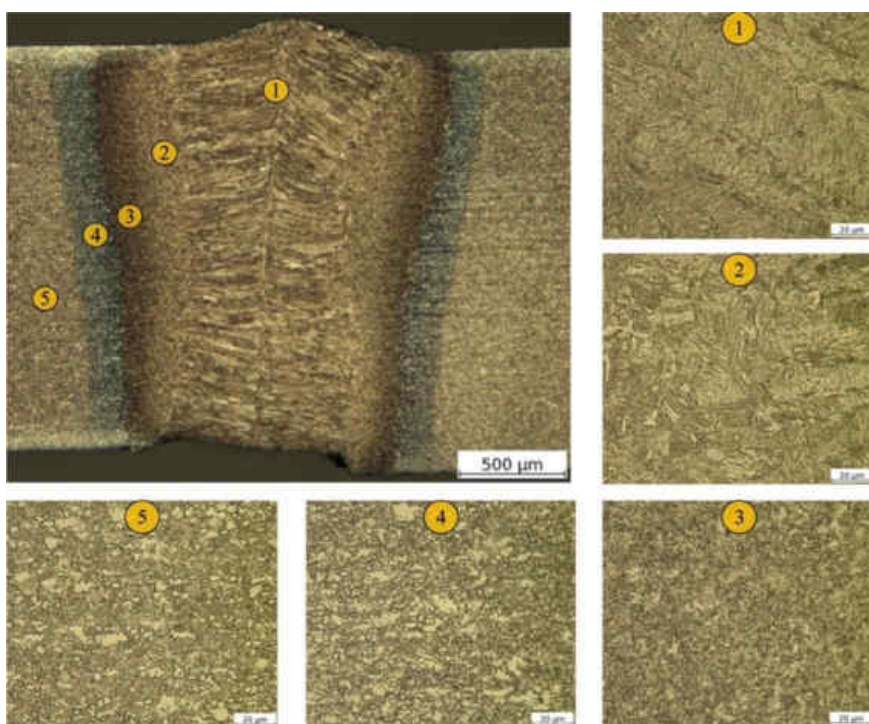
Badania wizualne przeprowadzono dla złączy wykonanych wiązką laserową o średnicach 0,3 mm i 0,6 mm. W wyniku oceny wizualnej złączy spawanych, nie zaobserwowano niezgodności spawalniczych, a widoki lica i grani były podobne do uzyskanych w przypadku stali Docol 800DP.

4.3.2. Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego

Na rys. 68 i rys. 69 przedstawiono zdjęcia ilustrujące złącza spawane oraz ich poszczególne strefy uzyskane odpowiednio dla próbek wytwarzanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz o średnicy 0,6 mm. Obszar wtopienia charakteryzuje się głównie strukturą martenzytyczną, można jednak zauważyć w niej niewielkie obszary bainitu o jaśniejszym zabarwieniu. Martenzyt i bainit występują także w grubo- i drobnoziarnistej strefie wpływu ciepła. Złącze wykonane wiązką laserową o średnicy 0,3 mm charakteryzuje się zmienną szerokością spoiny (rys. 68), która jest najszersza od strony lica i zmniejsza się w kierunku grani. W przypadku złącza wykonanego wiązką laserową o większej średnicy (rys. 69), szerokość spoiny zmienia się w zakresie od 0,6 mm w połowie grubości złącza do 0,9 mm na powierzchni lica. Zauważono również nadlew lica, wklęsnięcie grani oraz przesunięcie brzegów spawanych blach. Oba typy złączy spawanych sklasyfikowano w zakresie ostrych wymagań jakościowych (poziom B).



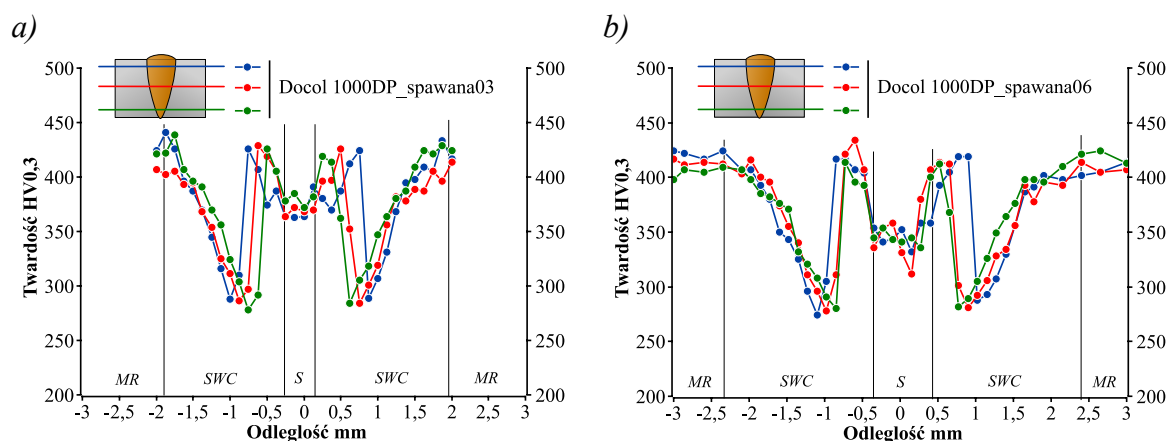
Rys. 68. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1000DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm.



Rys. 69. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1000DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm.

4.3.3. Rozkład mikrotwardości wykonanych złączy spawanych

Rozkłady twardości dla złączy spawanych wykonanych dwiema średnicami wiązki laserowej przedstawiono rys. 70a i b. Maksymalna wartość twardości w spoinie wyniosła 384 HV i 360 HV odpowiednio dla złączy wykonanych mniejszą (0,3 mm) i większą płamką procesową (0,6 mm). Podobnie jak w przypadku wyników uzyskanych dla połączeń spawanych wykonanych ze stali Docol 800DP zaobserwowano wzrost twardości drobnoziarnistej SWC do wartości ok. 430 HV, zbliżonej twardości materiałowi rodzimemu oraz spadek twardości w gruboziarnistej SWC do 280 HV. Dla obu typów złączy wartości twardości są zbliżone jednak w przypadku złącza wykonanego wiązką laserową o większej średnicy zauważono szerszą strefę przetopienia oraz SWC.



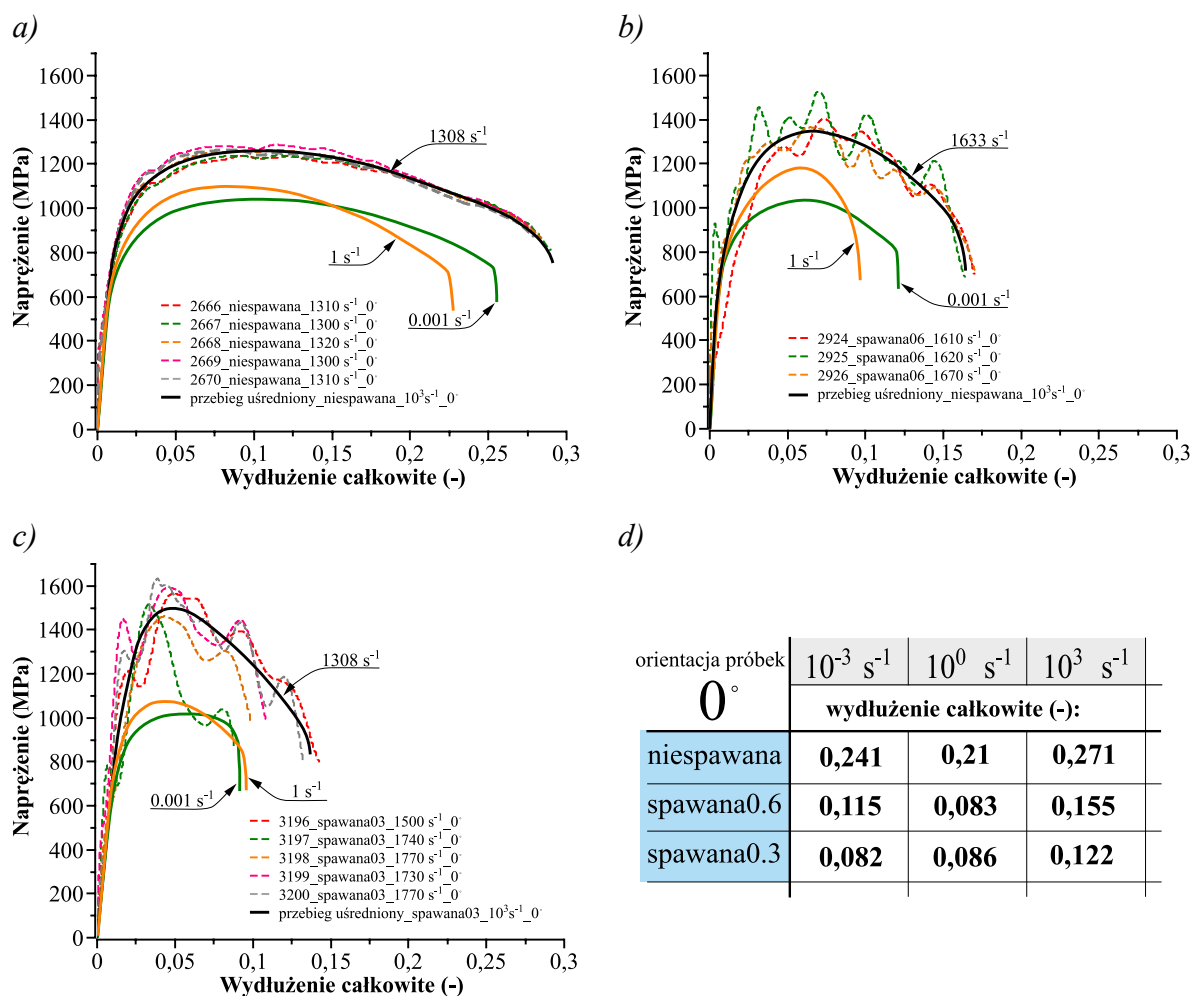
Rys. 70. Rozkłady mikrotwardości złączy wykonanych ze stali Docol 1000DP: a) spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) oraz 0,6 mm

4.3.4. Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 1000DP

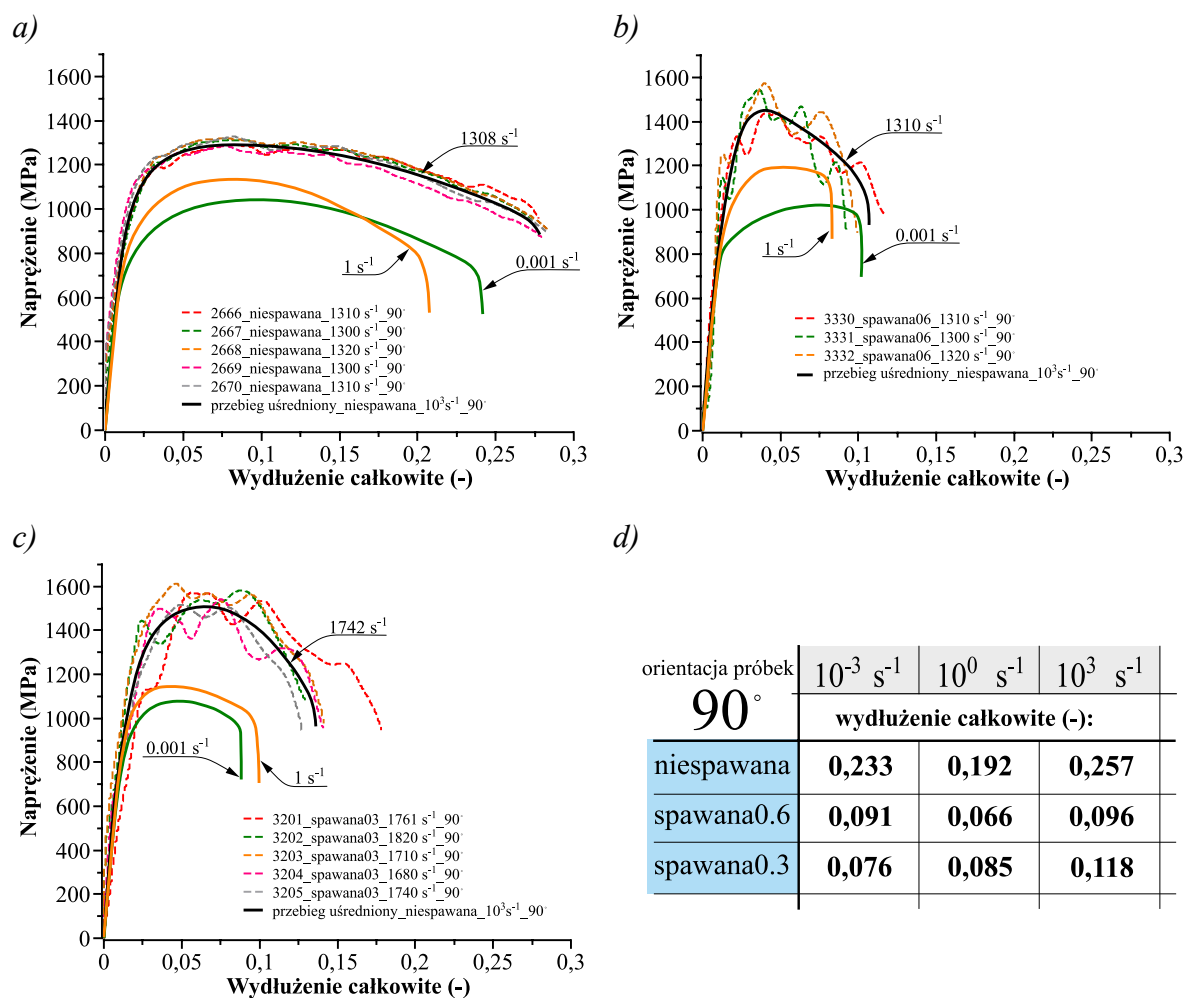
Krzywe odwzorowujące wyniki badań właściwości mechanicznych uzyskanych podczas testów wytrzymałościowych w warunkach quasi-statycznych oraz dynamicznych podzielono ze względu na kierunek wycinania próbek materiałowych. W zależności od analizowanego wariantu przedstawiono je kolejno na rys. 71 (0°), rys. 72 (90°) oraz na rys. 73 (45°). Dla każdej orientacji wycinania zestawiono wyniki dla próbek niespawanych, spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm oraz spawanych wiązką o średnicy 0,3 mm. Na rys. 71a przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych próbek niespawanych dla orientacji 0° oraz dla trzech poziomów szybkości odkształcenia. W warunkach obciążenia quasi-statycznego, wytrzymałość stali Docol 1000DP osiągnęła wartość 1100 MPa. Podczas testów prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego poziom naprężenia plastycznego płynięcia materiału wzrósł do wartości około 1275 MPa. Podobne wartości wytrzymałości otrzymano dla orientacji próbki wynoszącej 90° i 45° . Próbkę ze złączami spawanym wykazywały wyższą wytrzymałość w warunkach testu Hopkinsona w stosunku do próbek niespawanych. Najwyższy poziom naprężenia maksymalnego (ok. 1500 MPa) osiągnęły próbki spawane wiązką laserową o średnicy 0,3 mm dla wszystkich trzech orientacji wycinania próbek. Próbkę spawaną większą płamką procesową charakteryzowały się naprężeniami plastycznego płynięcia na nieco niższym poziomie. Otrzymane wartości dla orientacji 0° wyniosły 1340 MPa (rys. 71b), dla 90° - 1450 MPa (rys. 72b) oraz dla 45° - 1400 MPa (rys. 73b). W przypadku próbek o orientacji 45° ze złączami spawanymi większą średnicą wiązki laserowej stwierdzono zmniejszenie

wytrzymałości dla szybkości odkształcenia 1 s^{-1} . Uzyskana wartość naprężeń maksymalnych wyniosła 1030 MPa.

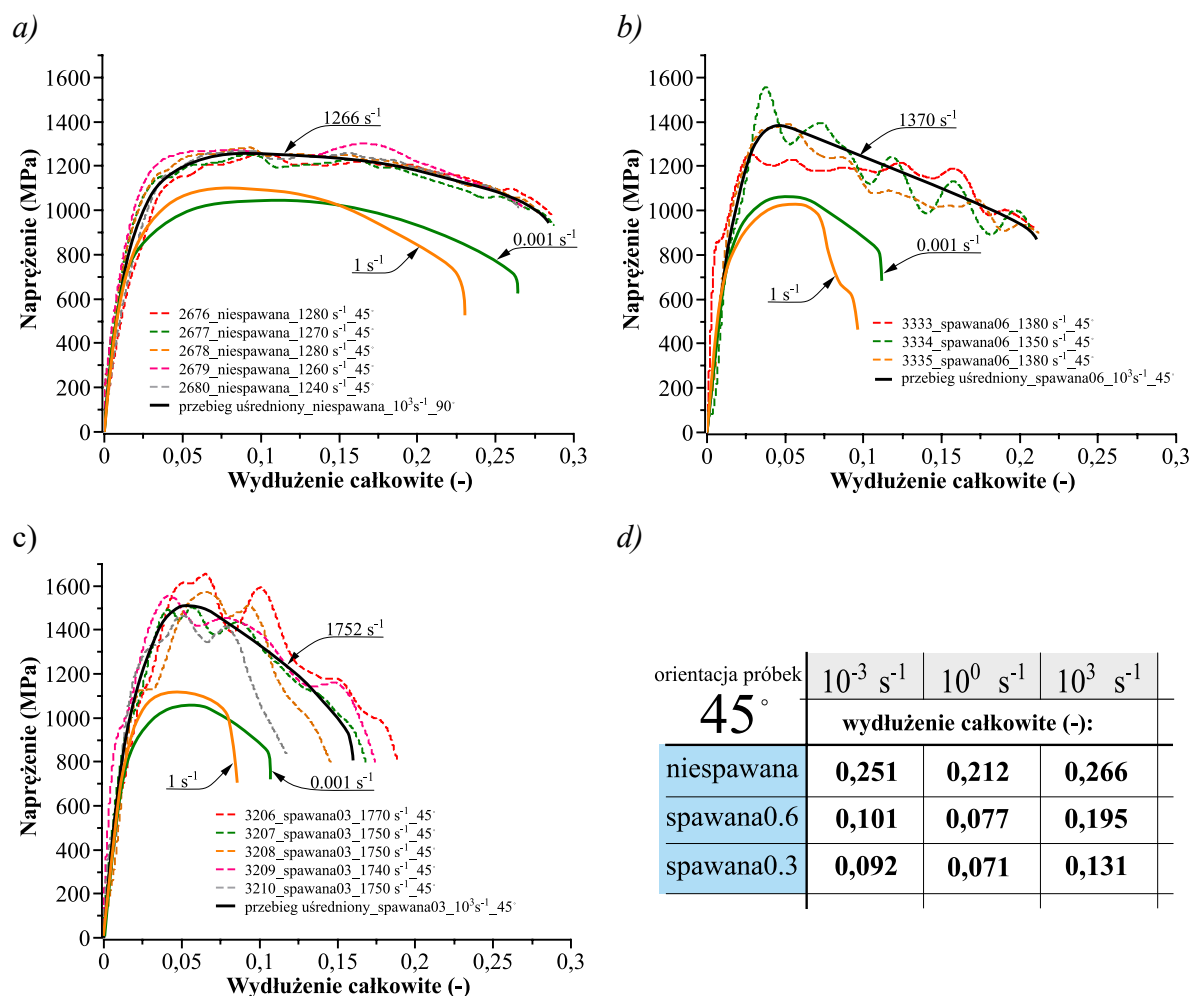
W zależności od orientacji wycinania próbek niespawanych, średnia wartość wydłużenia całkowitego dla dużych szybkości odkształcenia zmieniała się w zakresie od 0,257 do 0,270. W przypadku próbek ze złączami spawanymi wiązką laserową o średnicy 0,6 mm o orientacji równoległej (rys. 71b) i ukośnej (rys. 73b) zaobserwowano większą średnią wartość wydłużenia całkowitego w stosunku do próbek spawanych wiązką o średnicy 0,3 mm. Wydłużenie to wyniosło odpowiednio 0,155 dla orientacji 0° i 0,195 dla orientacji 45° . Dla kierunku wycinania próbek 90° (rys. 72b) zaobserwowano z kolei odwrotną zależność - próbki ze złączami spawanym mniejszą średnicą plamki procesowej wykazały większe wydłużenie całkowite – 0,118. Podobnie jak w przypadku wcześniej opisywanej stali typu DP, ciągliwość próbek niespawanych oraz próbek ze złączami spawanymi wiązką o średnicy 0,6 mm w zakresie średnich szybkości odkształcenia była mniejsza w stosunku do uzyskanych średnich wartości wydłużenia całkowitego określonych dla małych szybkości odkształcenia.



Rys. 71. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wylężenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 72. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



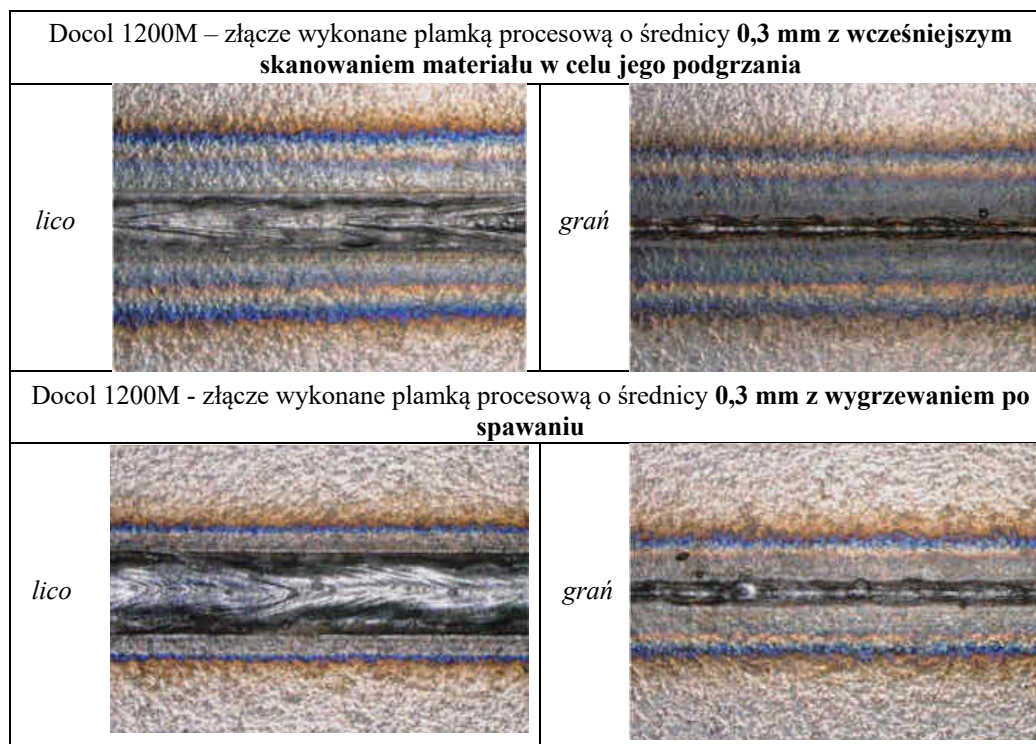
Rys. 73. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) nispawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia

4.4. BADANIA STALI DOCOL 1200M

4.4.1. Wizualna ocena jakości złącza spawanego

Badania wizualne przeprowadzono dla następujących warunków spawania: spawanie płamką procesową o średnicy 0,3 mm, o średnicy 0,6 mm, podgrzewania przed spawaniem płamką procesową o średnicy 0,3 mm (rys. 74) oraz wygrzewania złącza spawanego po spawaniu wiązką laserową o średnicy 0,3 mm (rys. 74). W wyniku oceny wizualnej, złącza wykonane bez dodatkowych zabiegów cieplnych, charakteryzowały się podobnym

charakterem lica i grani w porównaniu do wcześniej prezentowanych wyników uzyskanych dla stali Docol 800DP i Docol 1000DP. W przypadku połączeń wygrzewanych po spawaniu zaobserwowano największy obszar oddziaływania cieplnego w odniesieniu do pozostałych połączeń. Ponadto, złącza te charakteryzowały się mniejszą niejednorodnością lica w stosunku do pozostałych złącz.

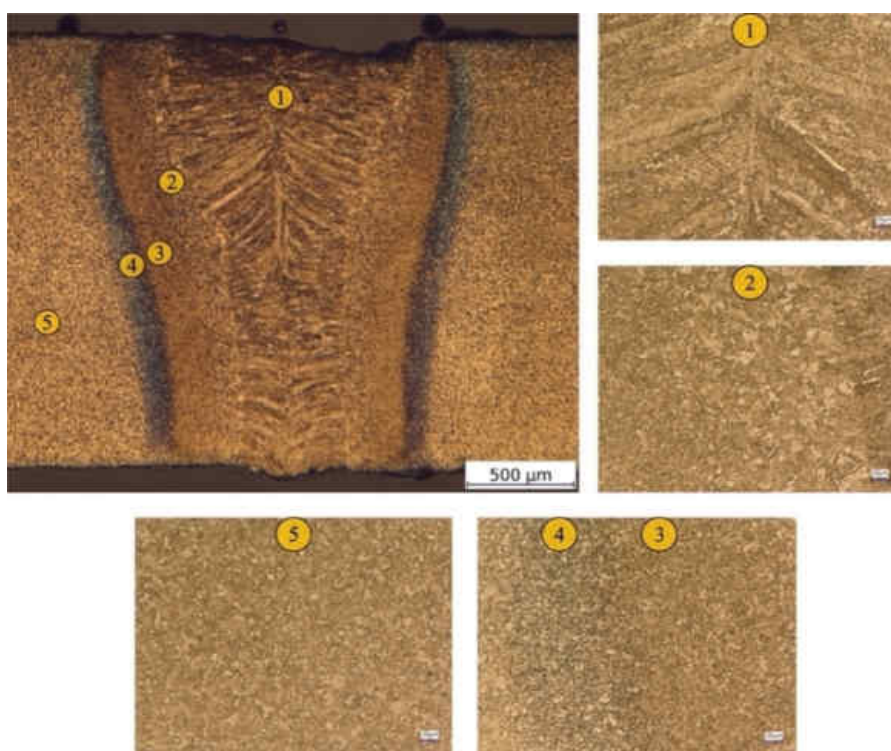


Rys. 74. Widoki profili lica i grani złącz wykonanych ze stali Docol 1000DP spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym wstępnym podgrzaniem oraz z wygrzewaniem po spawaniu

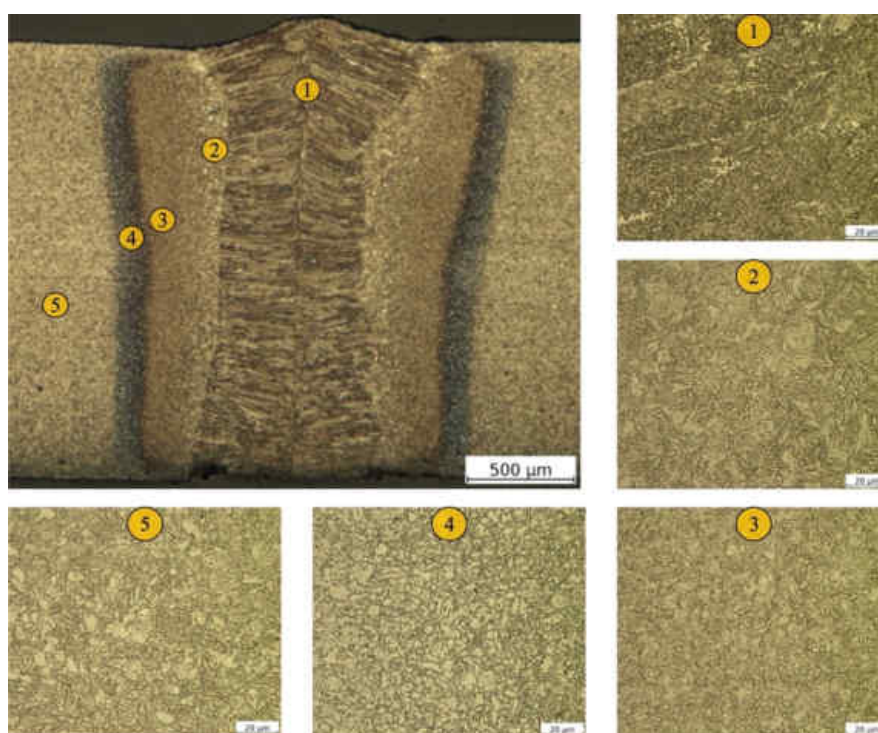
4.4.2. Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego

Widok złącza spawanego wiązką laserową o średnicy 0,3 mm przedstawiono na rys. 75. Strefa wtopienia charakteryzuje się strefą martenzytyczną z niewielką ilością ferrytu i bainitu, podobny rodzaj struktury materiału zaobserwowano również w drobnoziarnistej oraz gruboziarnistej strefie wpływu ciepła. Ponadto, strefa wtopienia charakteryzuje się zmienną szerokością, jej szerokość od strony lica to 0,8 mm i zmniejsza się wraz z rosnącą odległością w stronę grani, gdzie wynosi 0,3 mm. Analizując złącze pod kątem niezgodności spawalniczych widoczne jest nieznaczne, jednostronne wklęsnięcie lica. Złącze spełnia ostre wymagania jakościowe (wymagania ostre B). W przypadku złącza spawanego wiązką laserową o średnicy

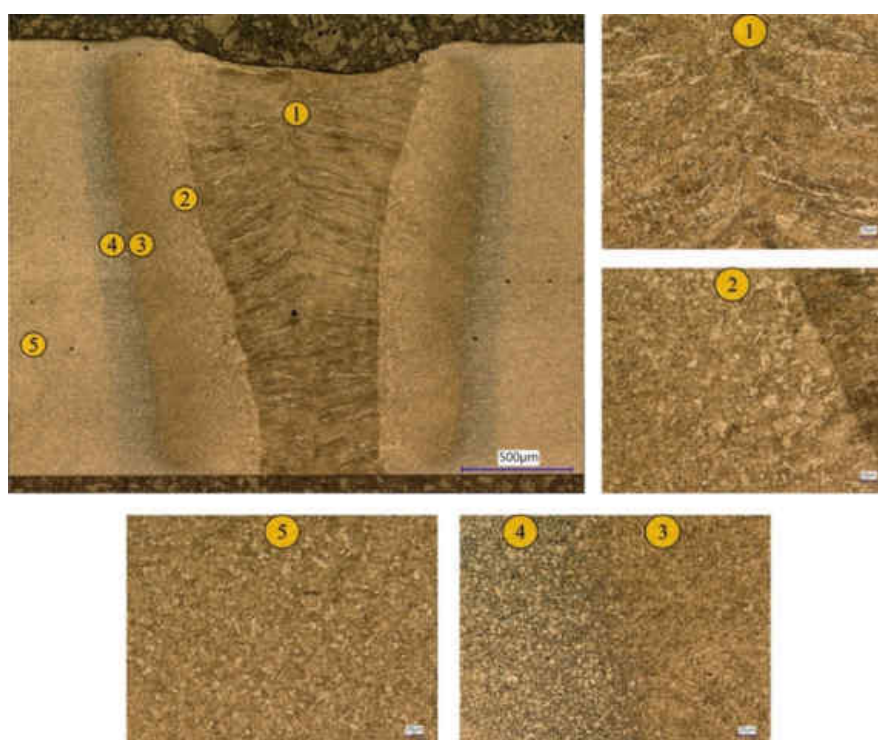
0,6 mm (rys. 76) widoczna jest zróżnicowana geometria spoiny, której szerokość wynosi 0,7 mm, a w najwęższym miejscu ok. 0,5 mm. Widoczny jest nadlew lica oraz przesunięcie spawanych blach względem siebie, jednak zakres wymiarowy ww. niezgodności pozwala na sklasyfikowanie złącza do ostrego poziomu wymagań jakościowych (wymagania ostre B) Widok złącza spawanego z wcześniejszym podgrzewaniem miejsca spawanego przedstawiono na rys. 77. Widoczne jest niepełne uzupełnienie rowka spawalniczego wynoszące 0,17 mm, w przypadku ostrych wymagań jakościowych, dla łączonych blach o grubości 2 mm wymiar ten nie może przekroczyć 0,2 mm, dlatego złącze mieści się w zakresie poziomu jakości B. Szerokość strefy wtopienia jest zbliżona do złącza wykonanego wiązką laserową o średnicy 0,3 mm. Widok połączenia spawanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm z późniejszym wygrzaniem zobrazowano na rys. 78.



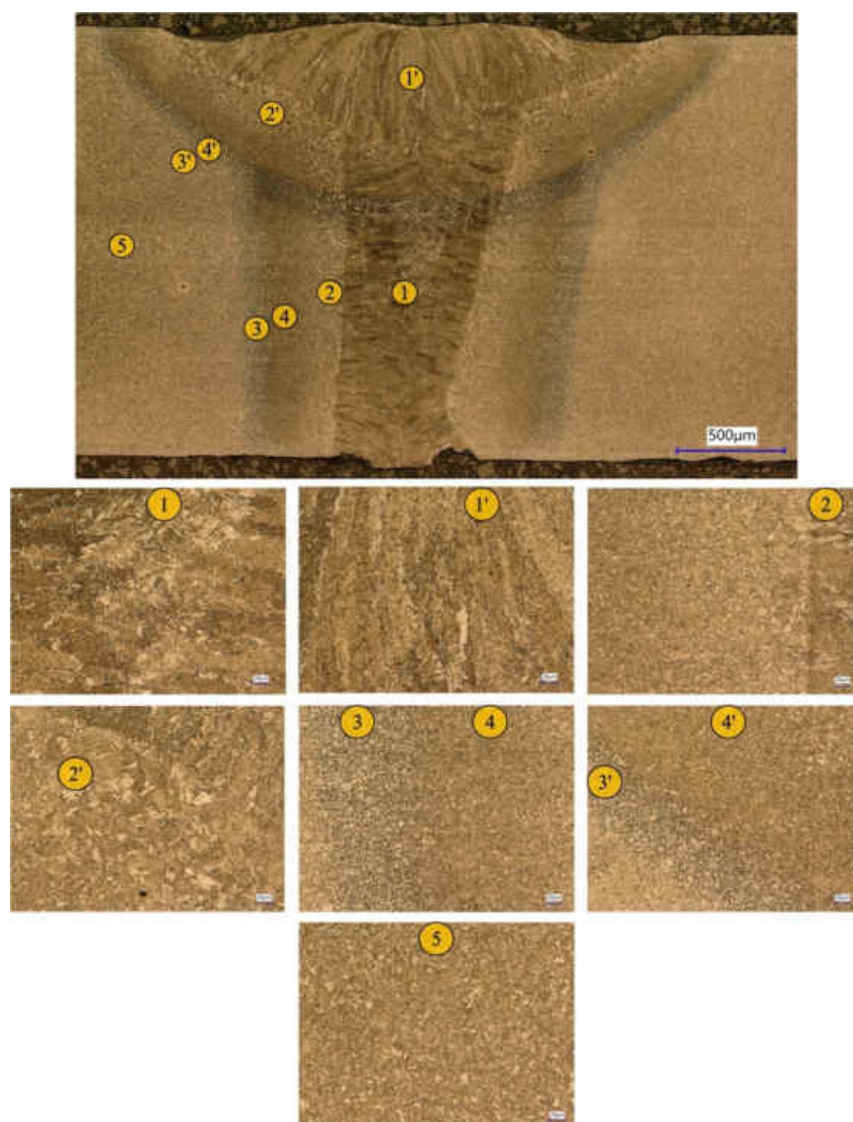
Rys. 75. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm



Rys. 76. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm



Rys. 77. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M, wykonanego poprzez wcześniejsze podgrzanie materiału wiązką laserową, a następnie pospawanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm

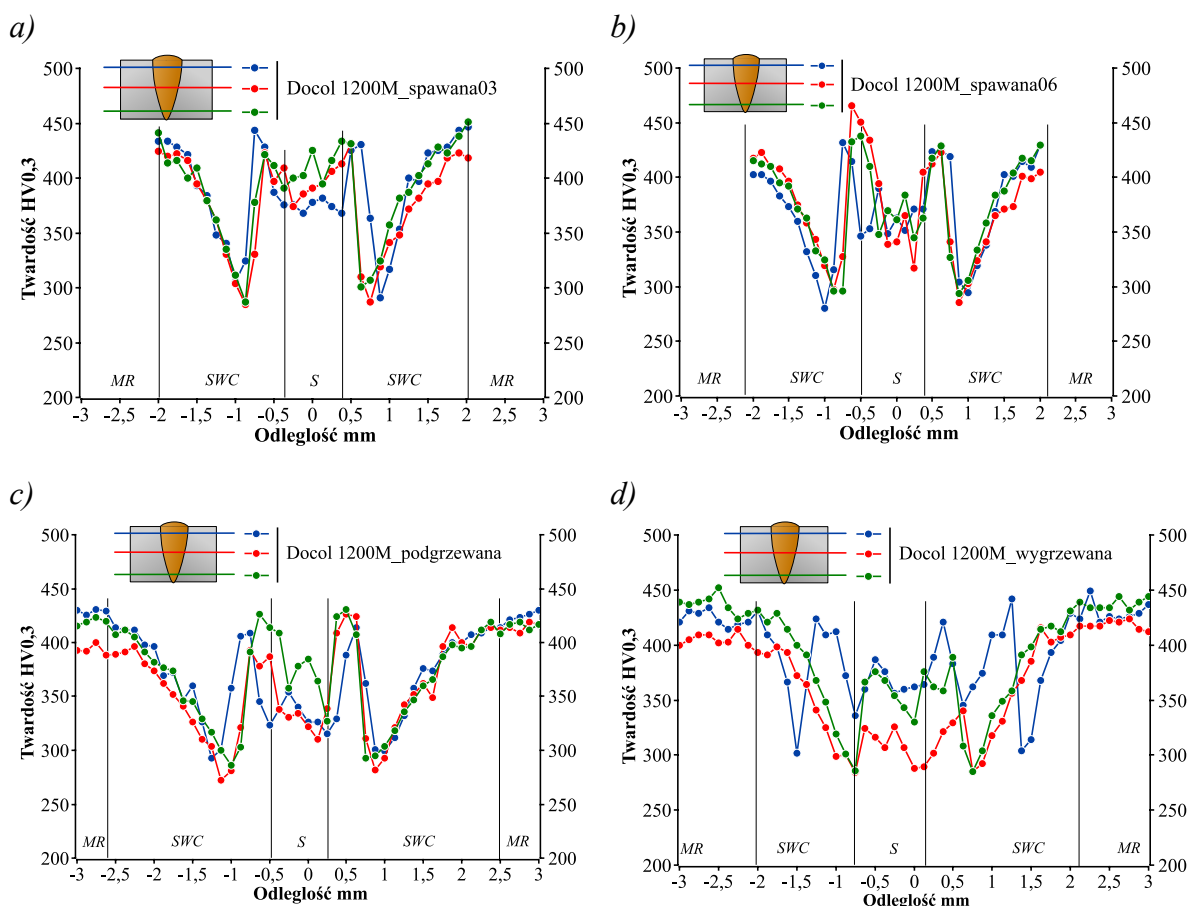


Rys. 78 . Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M, spawanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanego wiązką laserową bezpośrednio po spawaniu

4.4.3. Rozkład mikrotwardości wykonanych złącz spawanych

Na rys. 79 przedstawiono wyniki rozkładu mikrotwardości połączeń spawanych, wykonanych ze stali Docol 1200M. W przypadku złącza wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm twardość w strefie wtopienia wyniosła 375 HV, następnie wzrosła w drobnoziarnistej SWC i zmniejszyła się w strefie gruboziarnistej do wartości 285 HV. Twardość materiału rodzimego wyniosła ok. 435 HV. Istotną różnicą pomiędzy złączem wykonanym wiązką laserową 0,3 mm a 0,6 mm jest szersza strefa wtopienia oraz niższa twardość w przypadku złącza wykonanego płamką procesową o większej średnicy. Złącze

wykonane z dodatkowym podgrzewaniem laserowym przed spawaniem (rys. 79c) charakteryzuje się szeroką SWC oraz twardością w strefie wtopienia zmieniającą się w zakresie od 320 HV do 385 HV. Z kolei, złącza wygrzewane po spawaniu (rys. 79d) wykazują zróżnicowaną twardość w strefie wtopienia, która była najniższa w połowie przekroju poprzecznego złącza i wynosiła 288 HV.



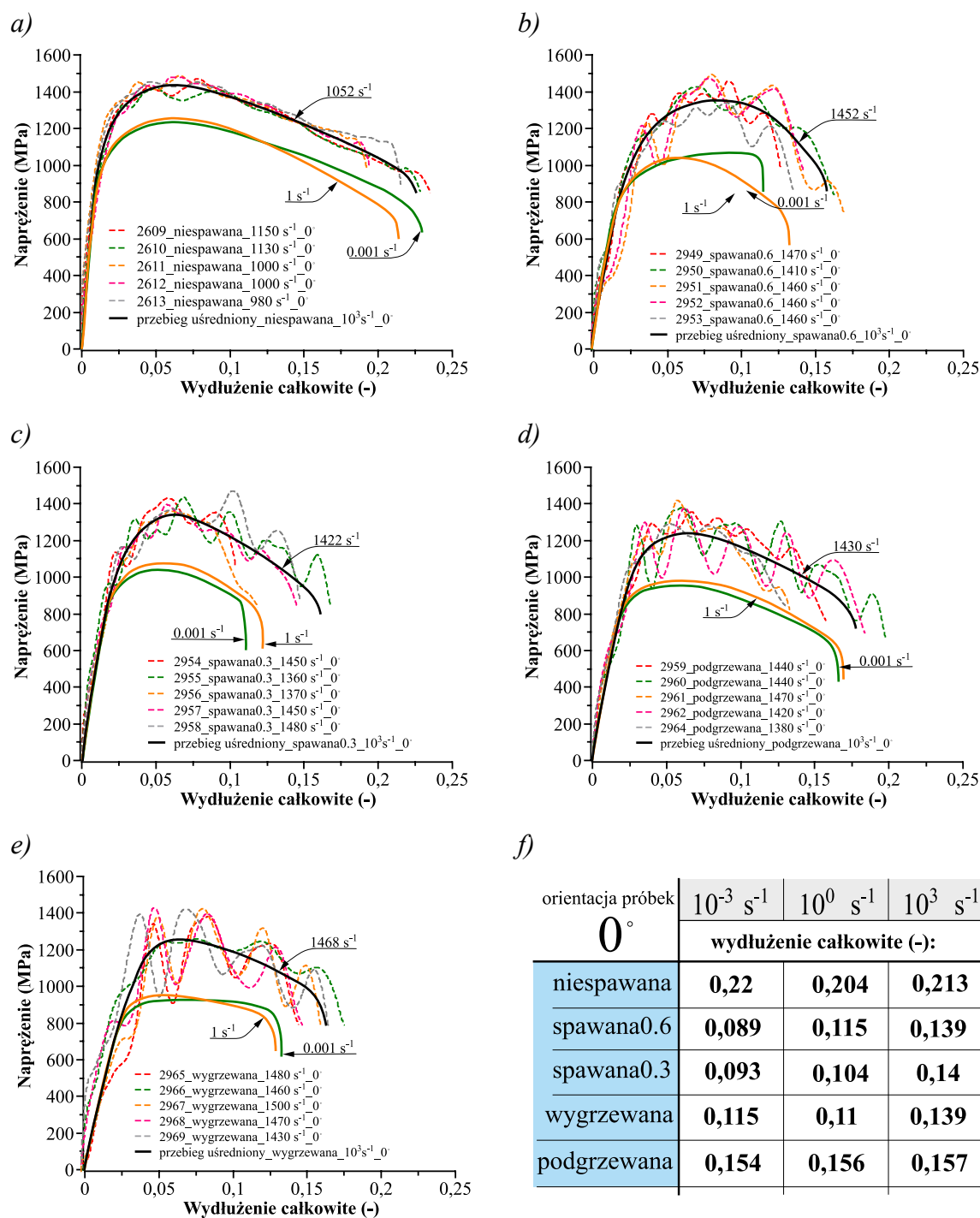
Rys. 79. Rozkłady mikrotwardości złącz wykonanych ze stali Docol 1200M: a) spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm; b), 0,6 mm; c) 0,3 mm z wcześniej podgrzaniem materiału poprzez skanowanie wiązką laserową; d) oraz 0,3 mm z wygrzaniem złącza bezpośrednio po spawaniu

4.4.4. Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 1200M

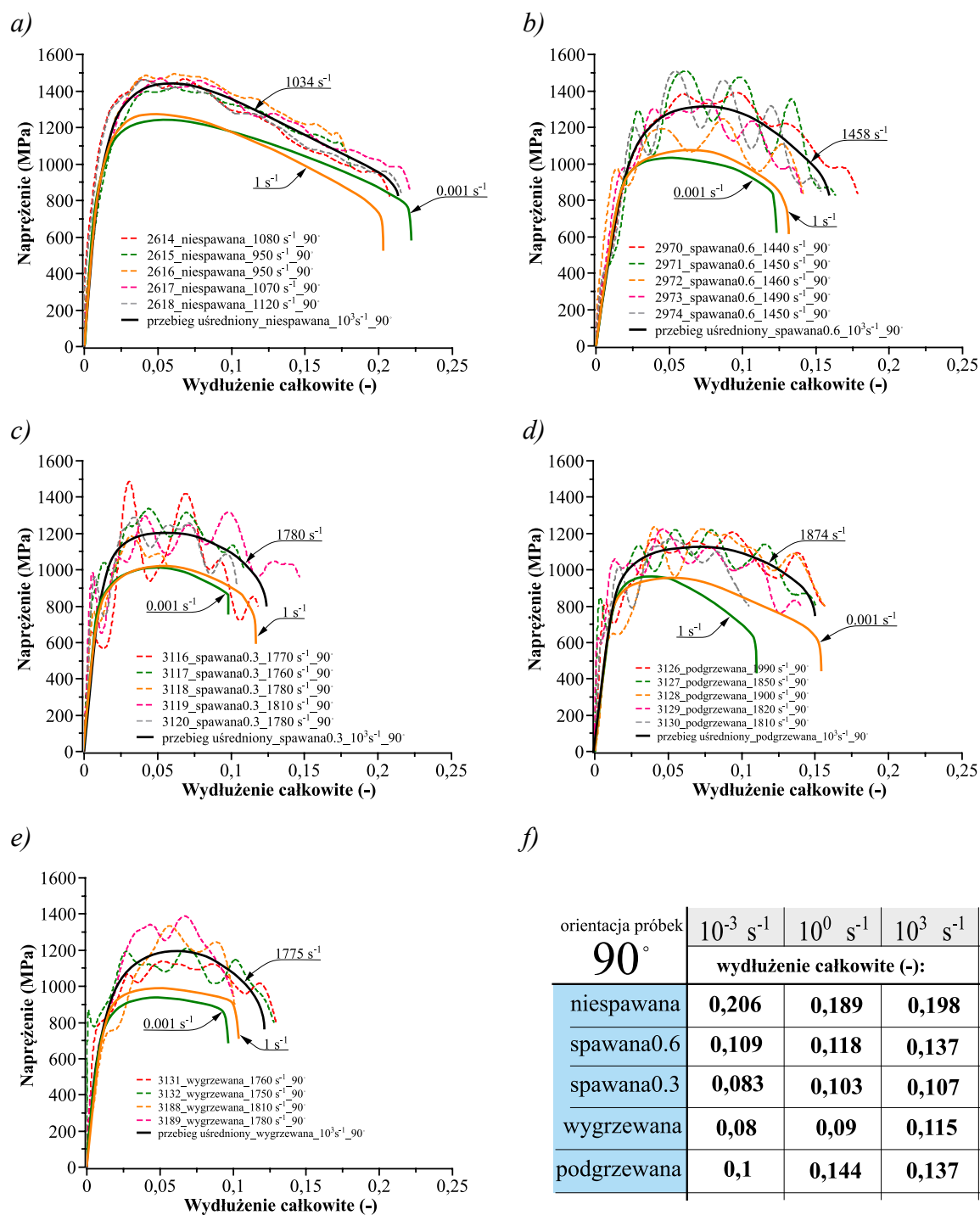
Krzywe rozciągania próbek niespawanych oraz próbek ze złączami spawanymi, podzielono ze względu na orientację względem kierunku wycinania i przedstawiono na rys. 80 (0°), rys. 81 (90°) oraz na rys. 82 (45°). Dla badanych kierunków wycinania próbek zestawiono wyniki właściwości mechanicznych uzyskane podczas rozciągania dla trzech poziomów szybkości odkształcenia. Testy zrealizowano dla próbek niespawanych, próbek spawanych

wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz spawanych wiązką laserową 0,6 mm. Dodatkowo dla orientacji wycinania 0° i 90° przedstawiono wyniki testów rozciągania z uwzględnieniem wpływu podgrzania materiału przed procesem spawania oraz wygrzania złącza spawanego po spawaniu laserowym. Na rys. 80a zestawiono krzywe odwzorowujące właściwości mechaniczne próbek niespawanych. Porównane krzywe wskazują na nieznaczny wzrost wytrzymałości stali Docol 1200M (1260 MPa) w zakresie szybkości odkształcenia $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$. Podczas testów prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego, wartość naprężeń maksymalnych wyniosła 1450 MPa i była na porównywalnym poziomie dla wszystkich badanych orientacji wycinania próbek. Próbki spawane płamką procesową 0,3 mm, charakteryzowały się najwyższym poziomem plastycznego płynięcia dla orientacji 0° (1420 MPa). Dla pozostałych kierunków wycinania wartość ta wyniosła zaledwie 1220 MPa. W przypadku próbek ze złączami spawanymi wiązką o średnicy 0,6 mm stwierdzono spadek wytrzymałość do poziomu $1340 \div 1390$ MPa dla trzech badanych orientacji wycinania próbek. Wyniki badań w zakresie quasi-statycznego obciążenia wskazują, że jedynie w przypadku próbek niespawanych, naprężenia maksymalne osiągnęły poziom 1200 MPa, natomiast wytrzymałość próbek spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm i 0,6 mm osiągnęła wartości nieco powyżej 1000 MPa. Najmniejszą wytrzymałość złącz spawanych – około 920 MPa - stwierdzono dla próbek podgrzewanych (rys. 80d i rys. 81d) i wygrzewanych po spawaniu dla badanych orientacji wycinania (rys. 80e i rys. 81e).

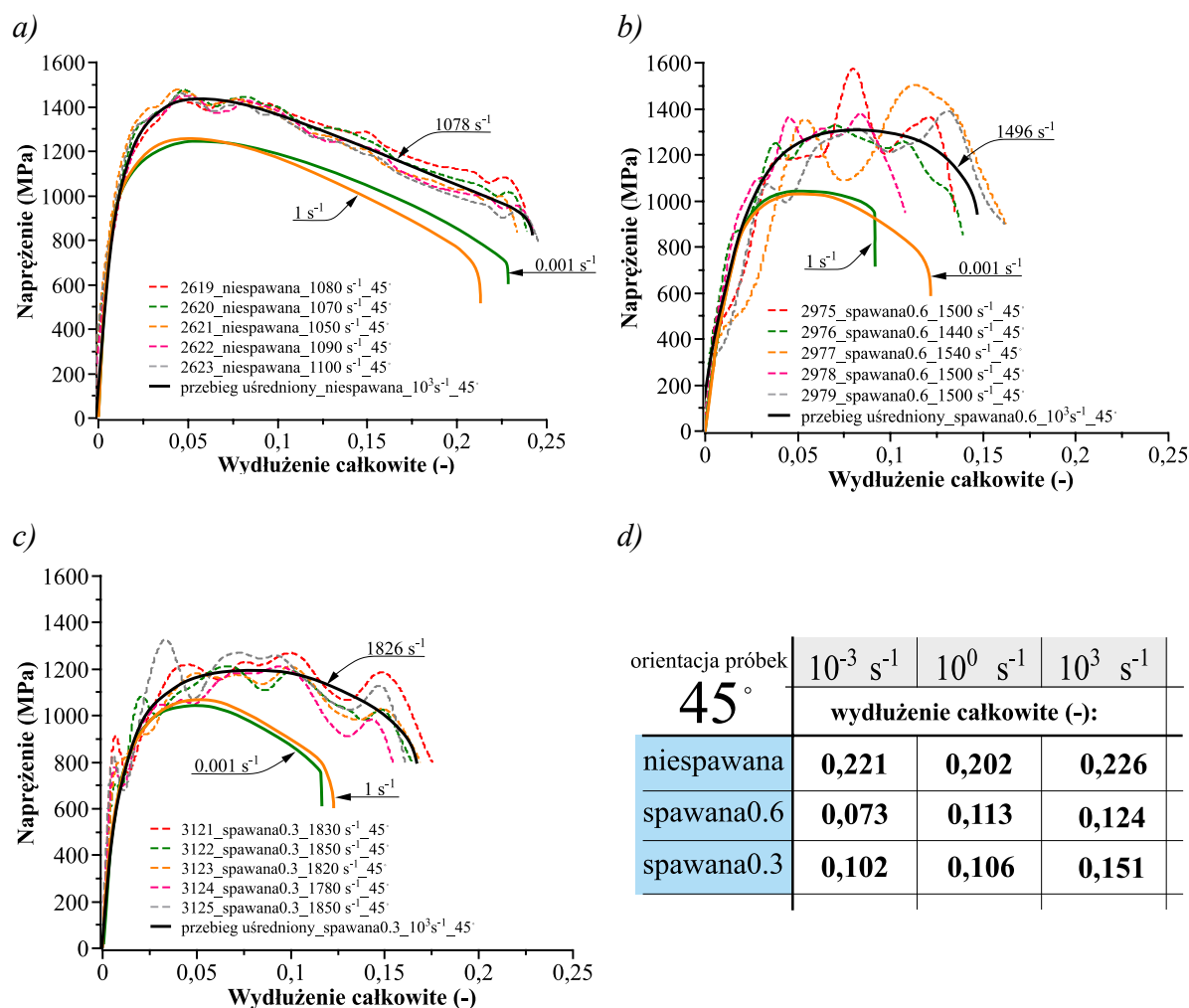
Próbki z dodatkowymi procesami cieplnymi w postaci podgrzewania przed spawaniem wykazały natomiast najlepszą ciągliwość w warunkach dużej szybkości odkształcenia. Spośród testowanych złącz spawanych; dla orientacji 0° wartość ta wyniosła 0,157 (rys. 80d), zaś dla orientacji 90° uzyskano 0,137 (rys. 81d). Dla równoległego kierunku wycinania próbki średnia wartość wydłużenia całkowitego wynosiła 0,14, natomiast w przypadku orientacji prostopadłej najniższa średnia wartość wydłużenia całkowitego dla próbek ze złączami spawanymi wiązką laserową o średnicy 0,3 mm wyniosła 0,107. Spadek ciągliwości świadczy o dużej anizotropii mikrostruktury materiału, gdyż próbki o orientacji 45° wykazały największe wydłużenie całkowite - 0,151. Wydłużenie próbek niespawanych, w zakresie szybkości odkształcenia $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$ zmieniało się od 0,20 do 0,23 dla wszystkich testowanych kierunków wycinania próbek.



Rys. 80. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 81. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niewspawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 82. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia

4.5. BADANIA STALI DOCOL 1500M

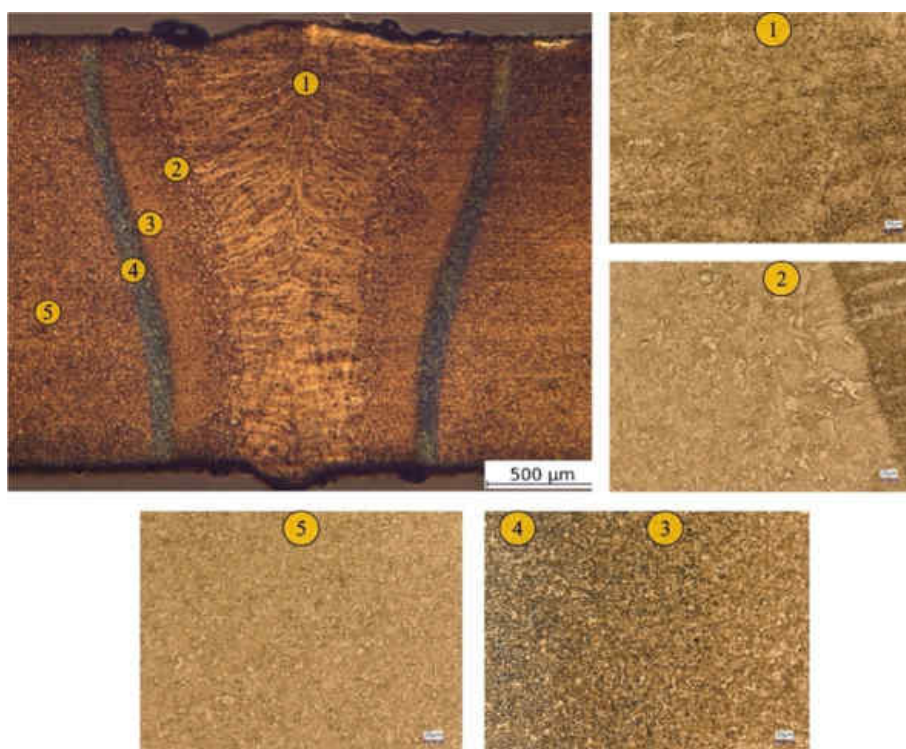
4.5.1. Wizualna ocena jakości złącza spawanego

W wyniku oceny wizualnej połączeń spawanych zaobserwowano niezgodności spawalnicze podobne do tych, które zaprezentowano w poprzednio omawianych materiałach zimnowalcowanych – stalach Docol 800DP, Docol 1000DP, Docol 1200M. Dokonując oceny wizualnej uzyskanych połączeń spawanych stwierdzono obecność pojedynczych rozprysków

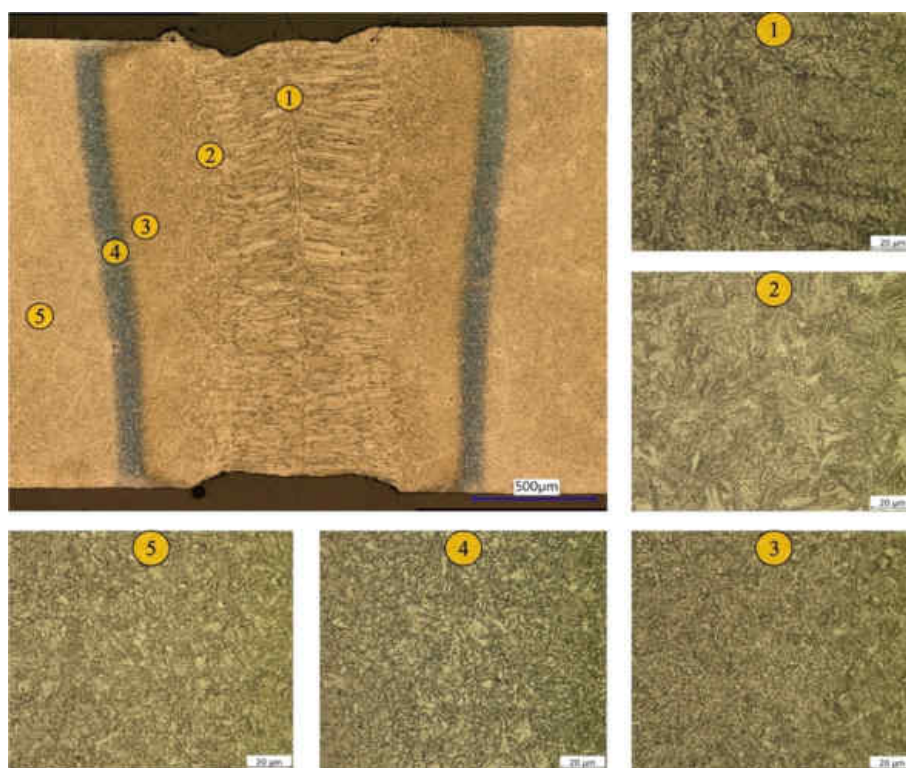
spawalniczych, które można było usunąć osłoniętą dłonią bez użycia dodatkowych narzędzi oraz w przypadku złącza podgrzewanego - niezupełne wypełnienie rowka spawalniczego.

4.5.2. Ocena mikrostruktury i geometrii złącza spawanego

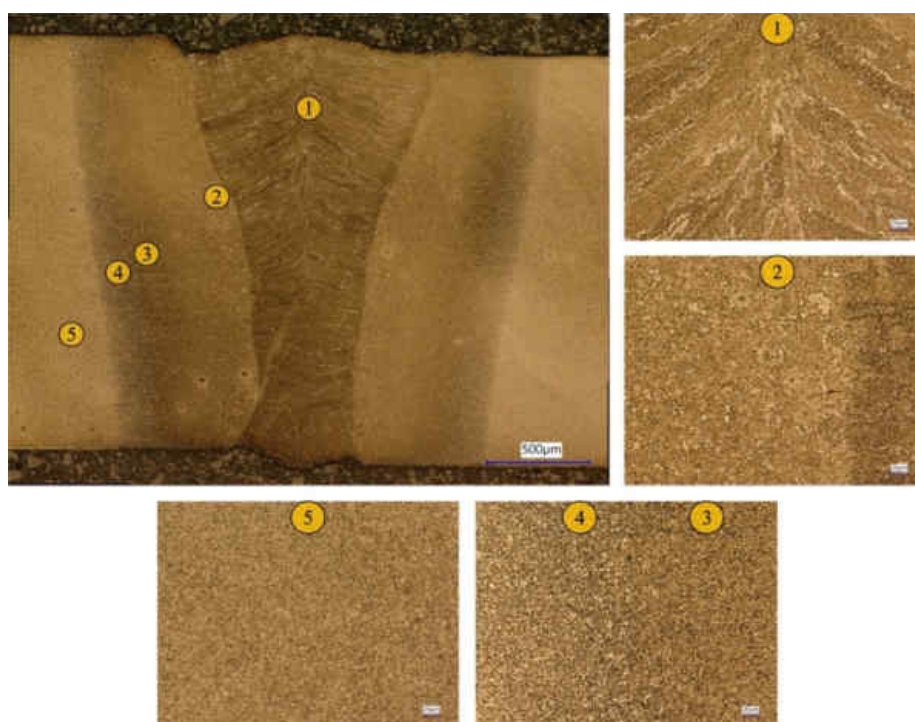
Stal Docol 1500M spawana wiązką lasera o średnicy 0,6 mm charakteryzuje się mikrostrukturą martenzytyczną (rys. 84), którą również zaobserwowano w strefie wtopienia oraz w strefach grubo- i drobnoziarnistej. W obu ww. strefach nastąpiła jego pełna austenitizacja, a następnie szybkie chłodzenie warunkujące powstanie martenzytu. Ukształtowanie drobniejszej struktury w strefie drobnoziarnistej SWC jest spowodowane ograniczeniem przyrostu ziarna austenitu (większe oddalenie od granicy wtopienia – obszaru działania wiązki lasera). W strefie ICHAZ materiał został nagrany w zakresie temperatur A_{c1} - A_{c3} , a zatem do wartości występowania austenitu i ferrytu, w rezultacie tego nagrzania wytworzyła się struktura ferrytyczno-martenzytyczna. Widoczny jest także obszar materiału przegrzanego, gdzie występuje struktura odpuszczonego martenzytu. Złącza spawane wiązką laserową o średnicy 0,3 mm (rys. 83) charakteryzują się odmienną geometrią linii wtopienia. Obszar linii wtopienia przy grani dla obu złącz spawanych wiązką 0,6 i 0,3 mm ma zbliżoną szerokość, natomiast dla połączenia spawanego wiązką o średnicy 0,3 mm, obszar ten zwęża się w kierunku lica spoiny. Operacja wygrzewania końcowego zmienia znacznie geometrię grani spoiny (rys. 86). Szerokość linii wtopienia to ok. 1,2 mm, która następnie zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości pomiędzy licem a granią złącza i wynosi od strony grani 0,4 mm. Omawiane złącza spawane zaklasyfikowano do poziomu jakości B.



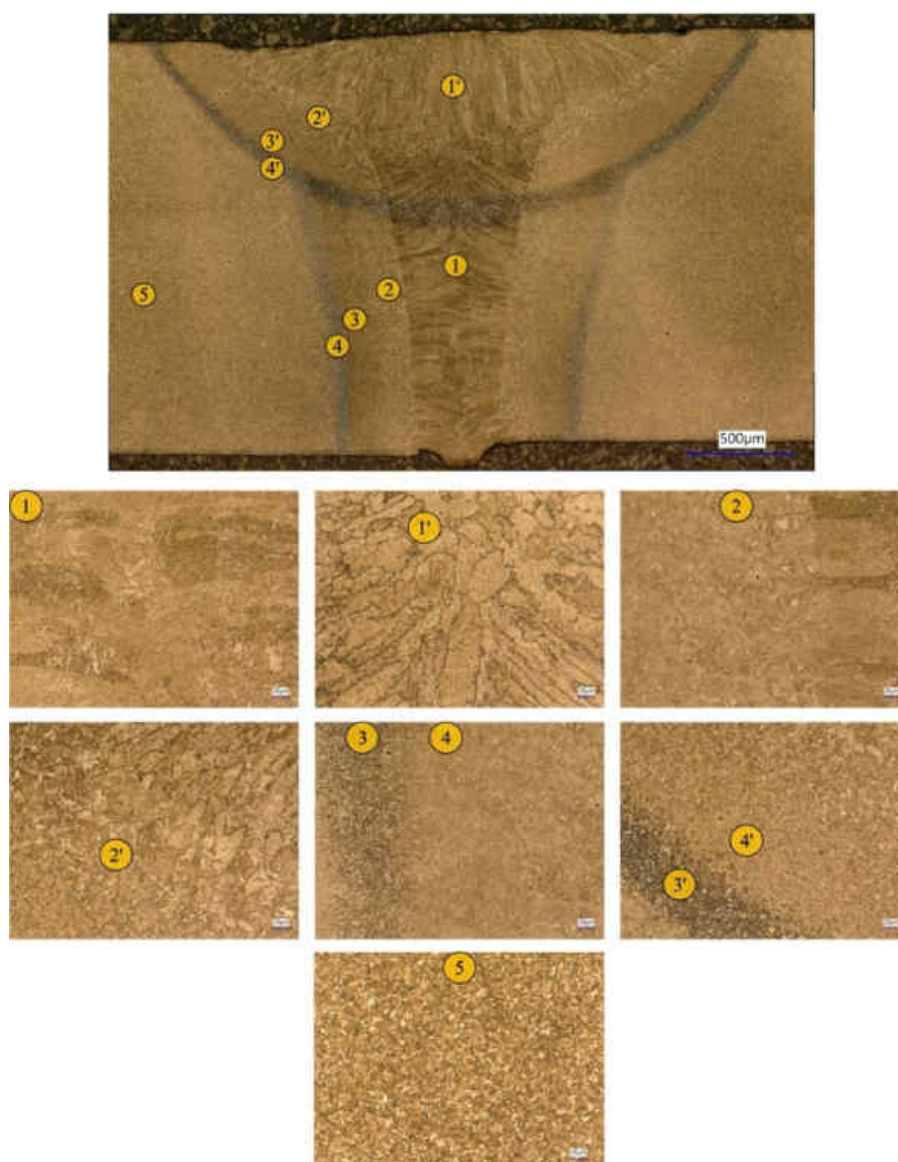
Rys. 83. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm.



Rys. 84. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm.



Rys. 85. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M podgrzewanej i spawana płamką procesową o średnicy 0,3 mm



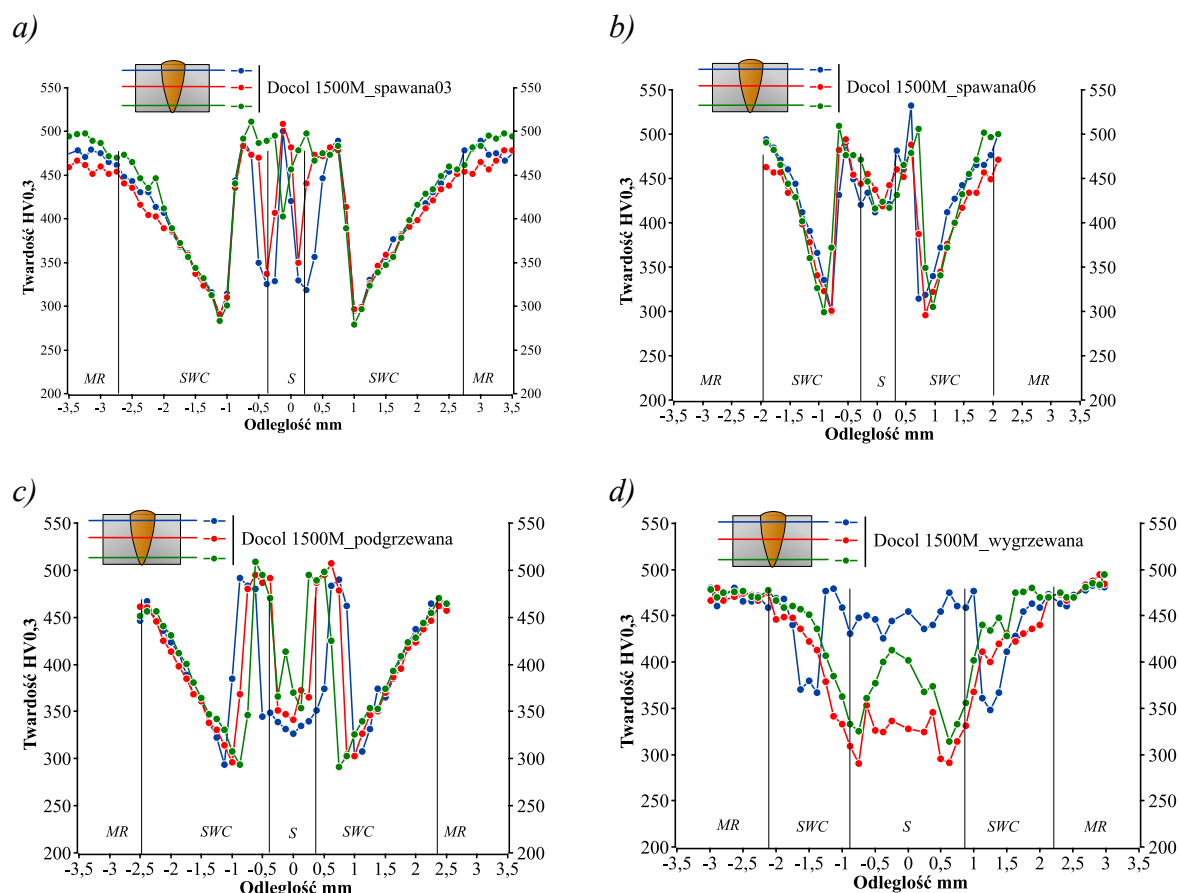
Rys. 86. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M, wykonanego poprzez wcześniejsze podgrzanie materiału wiązką laserową, a następnie pospawanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm

4.5.3. Rozkład mikrotwardości wykonanych złączy spawanych

Na rys. 87a widoczny jest rozkład twardości złącza wykonanego wiązką laserową o średnicy 0,3 mm. Widoczna jest zmienność twardości w strefie wtopienia, która zmienia się w zakresie od 340 HV do wartości ok. 500HV. Wartość maksymalna jest zbliżona do twardości materiału rodzimego. W SWC widoczny jest również spadek twardości do 285 HV. Szerokość SWC wynosi ok. 2,5 mm i jest zbliżona do szerokości widocznej w złączy wcześniej podgrzanym (rys. 87c), w którym zaobserwowano podobny charakter zmian twardości

w poszczególnych strefach. W porównaniu do złącza wykonanego bez dodatkowych procesów cieplnych, w strefie wtopienia zaobserwowano niższą twardość, a szerokość spoiny ulega wyraźnym zmianom.

Z kolei, na rys. 87b przedstawiono rozkład twardości złącza wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm, gdzie widoczny jest najpierw spadek twardości w strefie wtopienia do wartości 416 HV, potem wzrost w drobnoziarnistej SWC do 510 HV, a następnie spadek do 300 HV w strefie gruboziarnistej. Największe zróżnicowanie twardości można zauważyć w złączu nagrzewanym laserowo po spawaniu (rys. 87d), gdzie w zależności od lokalizacji linii pomiarowej występują różne wartości twardości. Najwyższą twardość stwierdzono na linii od strony lica i grani, wynoszącą odpowiednio 400 i 413 HV, natomiast najniższą twardość, na linii środkowej – 335 HV. Istotną cechą tego typu złącza jest również poziom twardości w gruboziarnistej SWC, który wynosi 367 HV, gdzie w przypadku pozostałych typów połączeń spawanych wartość ta wyniosła ok. 300 HV.

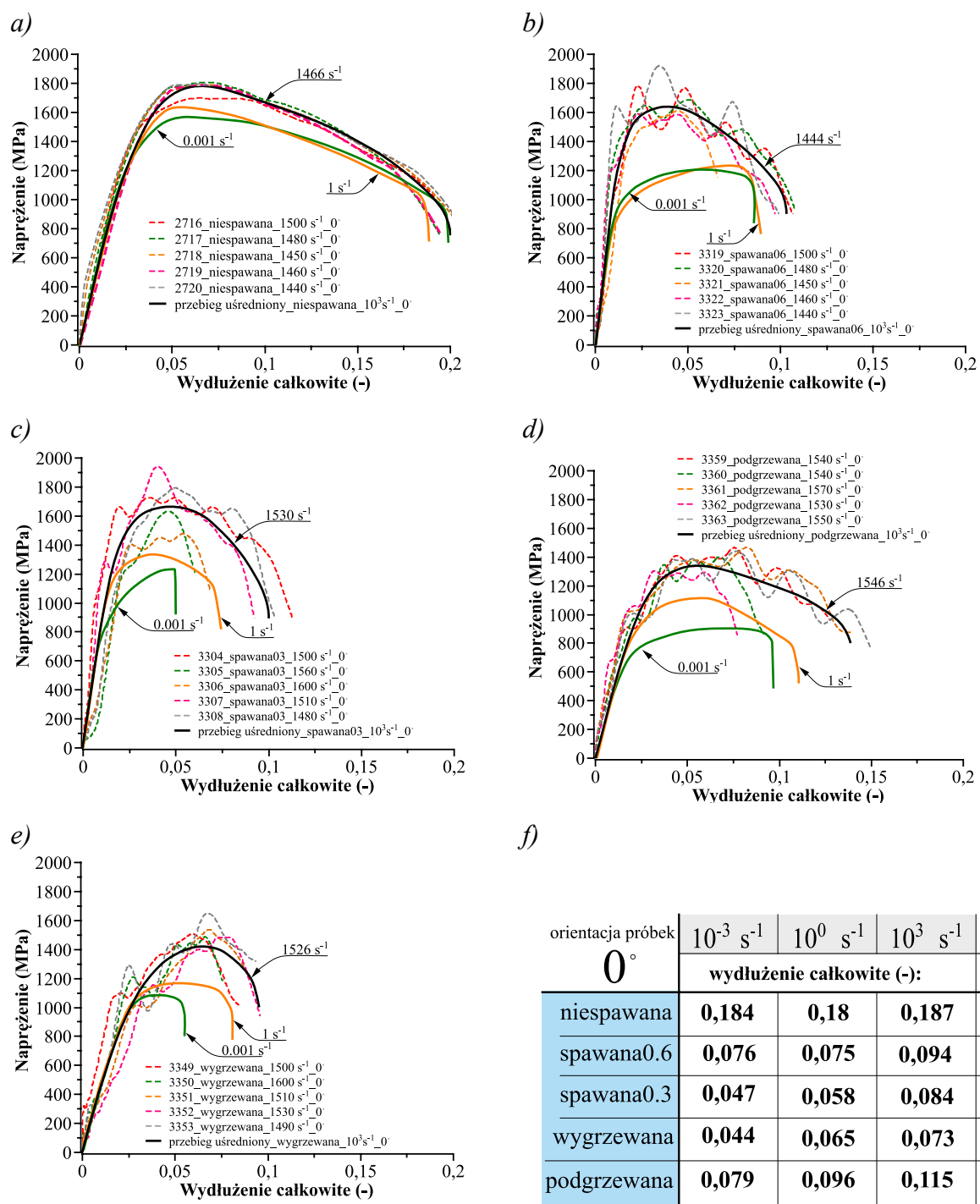


Rys. 87. Rozkłady mikrotwardości złączy wykonanych ze stali Docol 1500M: a) spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) 0,6 mm; c) 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem materiału poprzez skanowanie wiązką laserową; oraz d) 0,3 mm z wygrzaniem złącza bezpośrednio po spawaniu

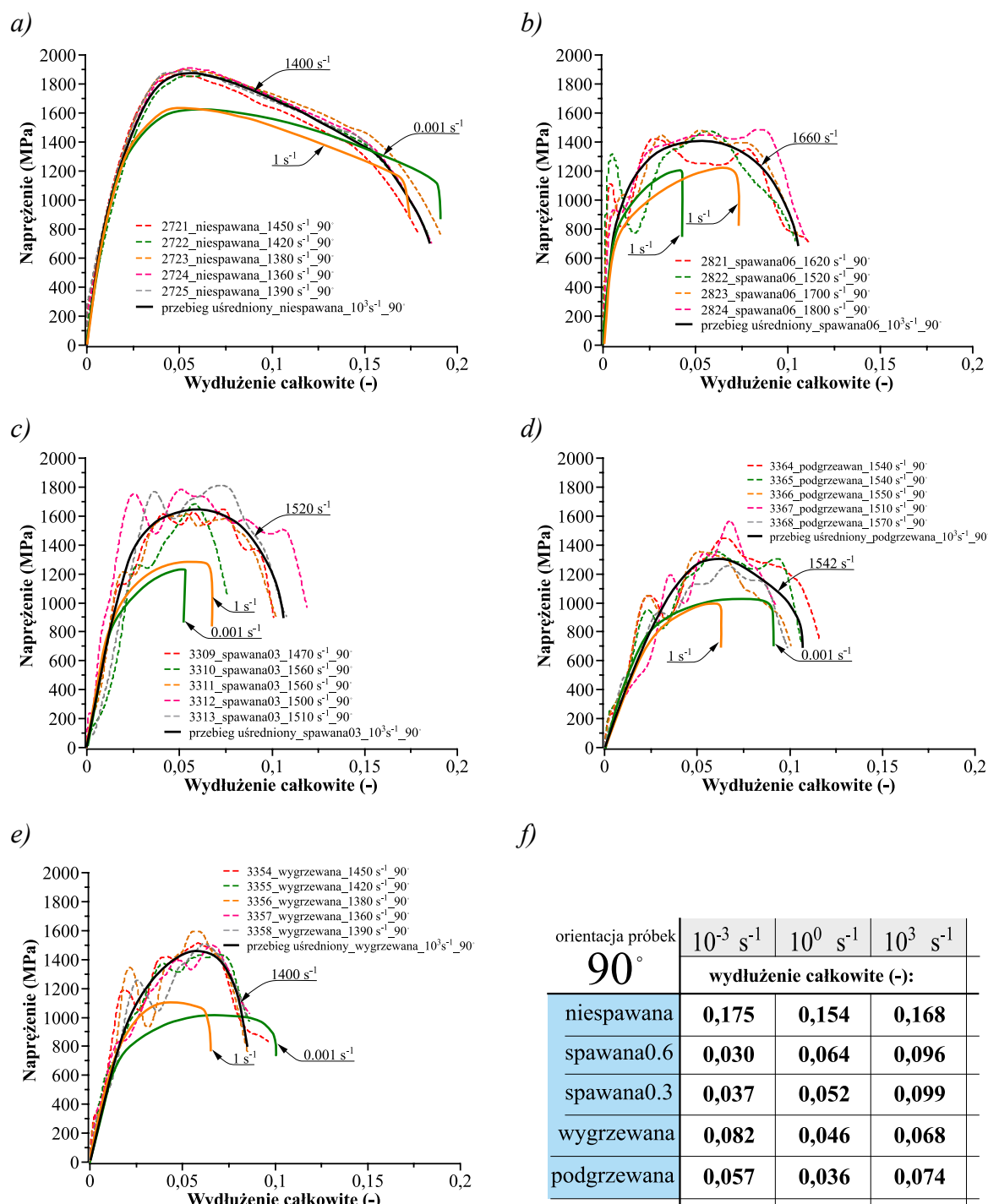
4.5.4. Ocena właściwości mechanicznych połączenia spawanego dla stali Docol 1500M

Otrzymane na podstawie przeprowadzonych testów rozciągania wyniki badań sklasyfikowano ze względu na orientację próbki względem kierunku wycinania. Wyznaczone krzywe materiałowe przedstawiono na rysunku rys. 88 (0°), rys. 89 (90°) oraz rys. 90 (45°). Badania przeprowadzono dla trzech poziomów szybkości odkształcenia, dla próbek niespawanych oraz próbek ze złączami spawanymi wiązką laserową o średnicy 0,3 mm lub 0,6 mm oraz ze złączami 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem materiału przed spawaniem oraz z wygrzaniem złącza po spawaniu. Wytrzymałość próbek niespawanych obciążonych z szybkością odkształcenia w przedziale $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$ wynosiła około 1640 MPa, zaś w warunkach obciążenia dynamicznego, maksymalny poziom naprężenia plastycznego płynięcia osiągnął wartość około 1900 MPa dla wszystkich badanych orientacji wycinania

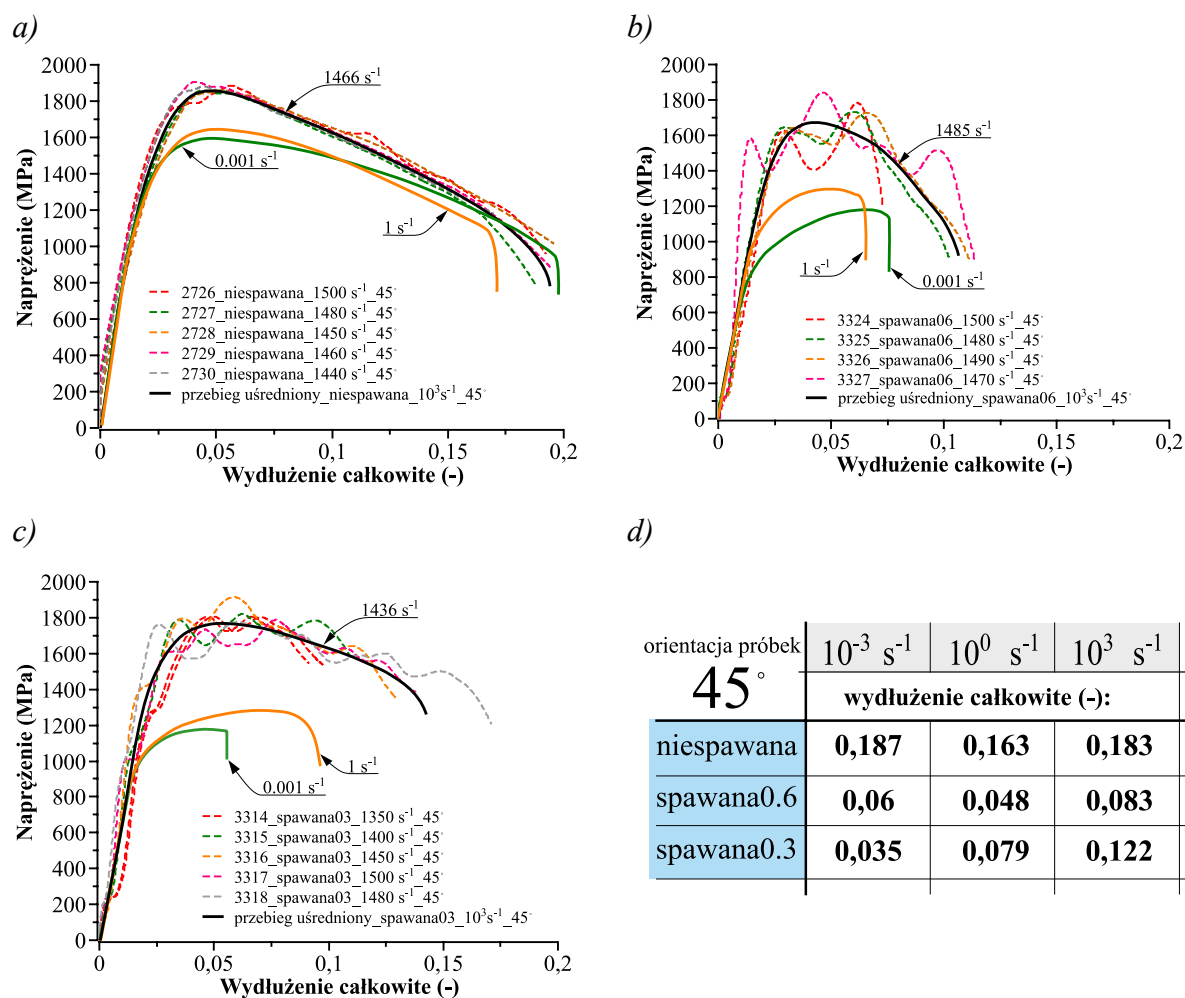
próbek. Z kolei, dla próbek ze złączami spawanymi wiązką laserową o średnicy 0,6 mm i 0,3 mm zaobserwowano spadek wytrzymałości. W przypadku próbek ze złączami spawanymi wykonanymi większą plamką, maksymalny poziom plastycznego płynięcia dla orientacji 0° (rys. 88b) i 45° (rys. 90b) mieścił się w zakresie 1650 – 1700 MPa. Wyjątkiem były tu próbki wycięte pod kątem 90° (rys. 89b), dla których uzyskano wartość naprężenia 1410 MPa. Próbki ze złączami spawanymi wiązką o mniejszej średnicy uzyskały największą wartość naprężenia dla orientacji 45° (rys. 90c) wynoszącą 1770 MPa. Podobnie jak w przypadku wcześniej omawianej stali Docol 1200M, jedynie próbki niespawane osiągnęły nominalny poziom naprężeń maksymalnych w warunkach obciążenia quasi-statycznego, wynoszący dla omawianej stali 1500 MPa. Najniższą wartość wytrzymałości stwierdzono dla próbek podgrzewanych przed spawaniem wynoszącą 1330 MPa, jednak przy ciągliwości przewyższającej pozostałe próbki ze złączami spawanymi, wynoszącą 0,155.



Rys. 88. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 89. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia



Rys. 90. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia

- strona celowo pozostawiona pusta -

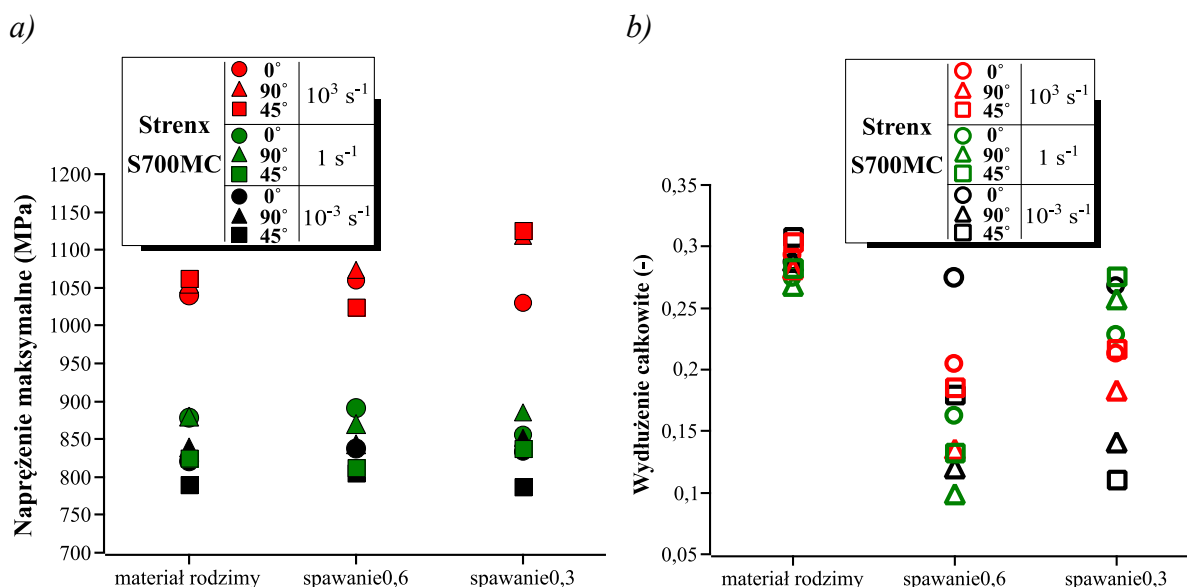
ROZDZIAŁ 5

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

5.1. WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH SPAWANIA LASEROWEGO NA WYTRZYMAŁOŚĆ I CIĄGLIWOŚĆ ZŁĄCZ SPAWANYCH

Do oceny wpływu parametrów procesu spawania laserowego na wytrzymałość i ciągliwość próbek ze złączami spawanymi zestawiono ze sobą dwa typy danych dotyczących podstawowych parametrów wytrzymałościowych badanych materiałów, tj. wartość naprężeń maksymalnych oraz wydłużenia całkowitego. Wyniki badań przedstawiono dla próbek niespawanych oraz w zależności od gatunku materiału, dla próbek ze złączami spawanym wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, 0,6 mm, podgrzewanych przed spawaniem wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, jak również wygrzewanych po spawaniu wiązką laserową o średnicy 0,3 mm.

Na rys. 91 przedstawiono wyniki dla próbek niespawanych i spawanych stali Strenx S700MC. Dla zakresu szybkości odkształcenia $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$, naprężenia maksymalne wyniosły od 790 do 895 MPa (rys. 91a), natomiast w przypadku dużych szybkości odkształcenia widoczny jest wzrost poziomu naprężenia plastycznego płynięcia, który jest najwyższy dla próbek ze złączami spawanymi wiązką laserową o średnicy 0,3 mm dla orientacji wycinania próbek 0° (1125 MPa) i 45° (1119 MPa). Pozostałe próbki spawane wykazały w zakresie quasi-statycznym zbliżone wartości naprężenia maksymalnego w stosunku do próbek niespawanych. W przypadku oceny ciągliwości próbek spawanych i niespawanych stwierdzono zbliżone wartości wydłużenia całkowitego próbek niespawanych dla wszystkich badanych kierunków wycinania próbek oraz przyjętych w trakcie testów poziomów szybkości odkształcenia. Nieco wyższe wydłużenie całkowite stwierdzono dla złącz wykonanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm (rys. 91b).

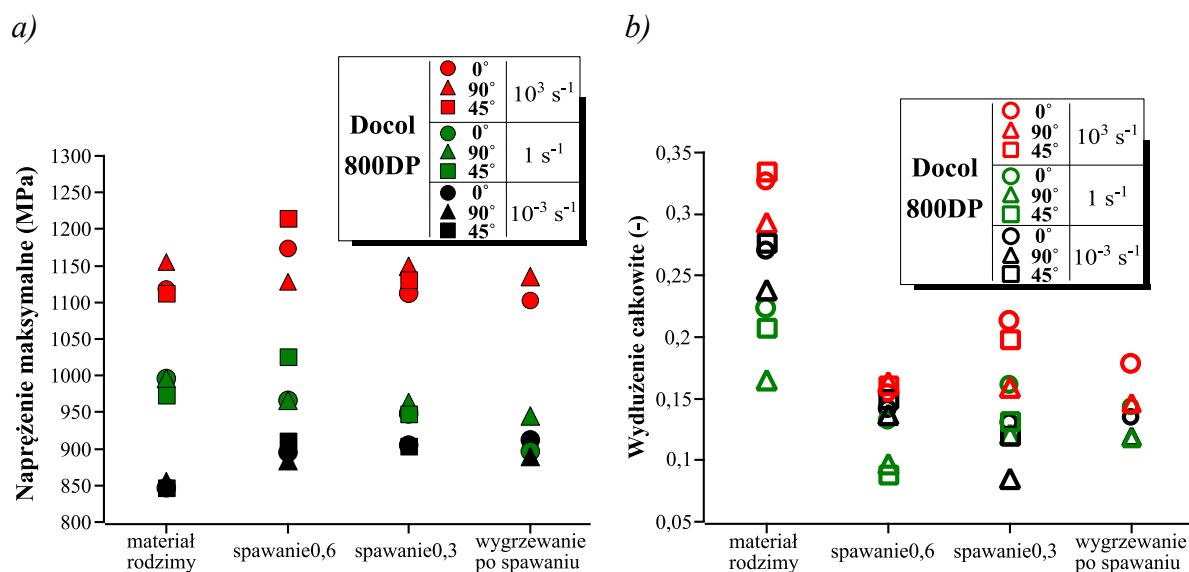


Rys. 91. Wpływ warunków spawania na wartość naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Strenx S700MC

(Kolorem znacznika oznaczono poziom szybkości odkształcania, geometrią - kierunek wycinania próbek)

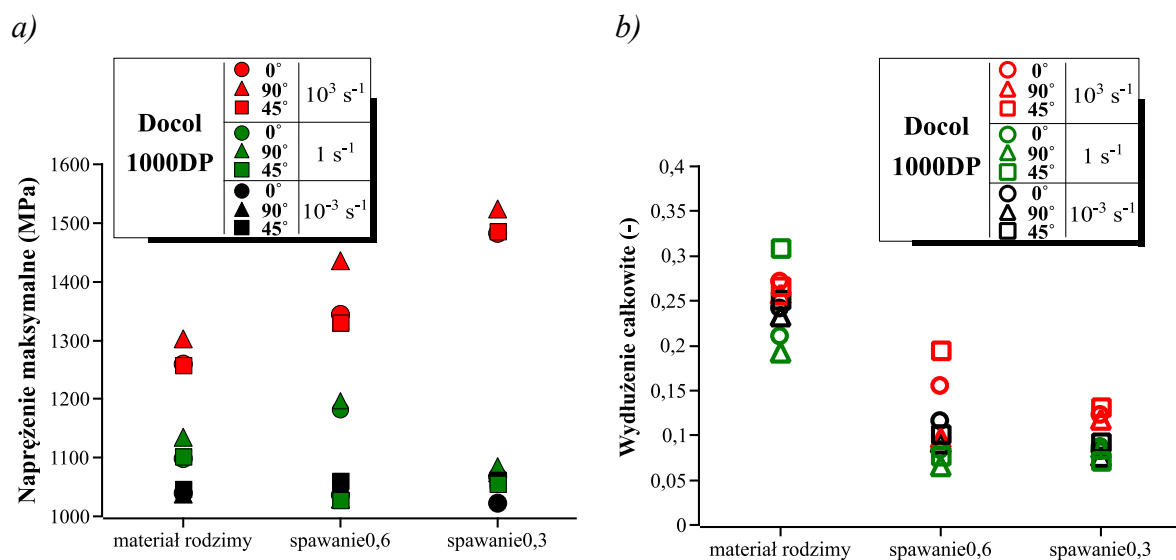
Rezultaty badań dla materiału niespawanego oraz próbek ze złączami spawanymi przedstawiono na rys. 92 i rys. 93 odpowiednio dla stali Docol 800DP i Docol 1000DP. Wytrzymałość próbek spawanych, wykonanych ze stali Docol 800DP, dla małych szybkości odkształcania była na zbliżonym poziomie - wyższym o ok. 50 MPa w stosunku do materiału niespawanego. Dla testów realizowanych dla średniego poziomu szybkości odkształcania naprężenia maksymalne złączy spawanych były dla większości próbek niższe niż wytrzymałość materiału rodzimego, zaś w warunkach dynamicznych wytrzymałość stali Docol 800DP charakteryzowała się zbliżonym poziomem, zaś stal Docol 1000DP wykazała wyższą wytrzymałość w stosunku do materiału niespawanego. Świadczy to o dużej wrażliwości tej stali na wprowadzone ciepło podczas procesu spawania na uzyskane właściwości mechaniczne.

Konsekwencją wzrostu wytrzymałości złączy spawanych obu stali DP był spadek wartości ich ciągliwości (rys. 92b; rys. 93b), zarówno dla próbek niespawanych i ze złączami spawanymi wiązką laserową o średnicy 0,6 mm, jak i w przypadku złączy wygrzewanych po spawaniu (tylko dla stali Docol 800DP). Najmniejszą wartość wydłużenia całkowitego stwierdzono dla średniego poziomu szybkości odkształcania dla orientacji wycinania próbek pod kątem 90° i 45°.



Rys. 92. Wpływ warunków spawania na wartości naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 800DP

(Kolorem znacznika oznaczono poziom szybkości odkształcenia, geometrią - kierunek wycinania próbek)

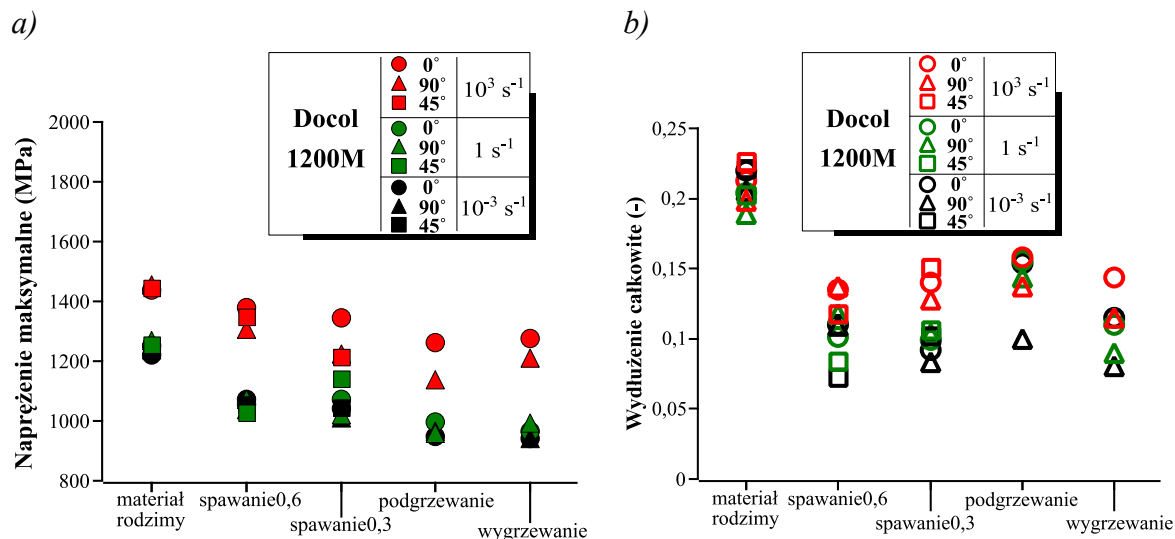


Rys. 93. Wpływ warunków spawania na wartość naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 1000DP

(Kolorem znacznika oznaczono poziom szybkości odkształcenia, geometrią - kierunek wycinania próbek)

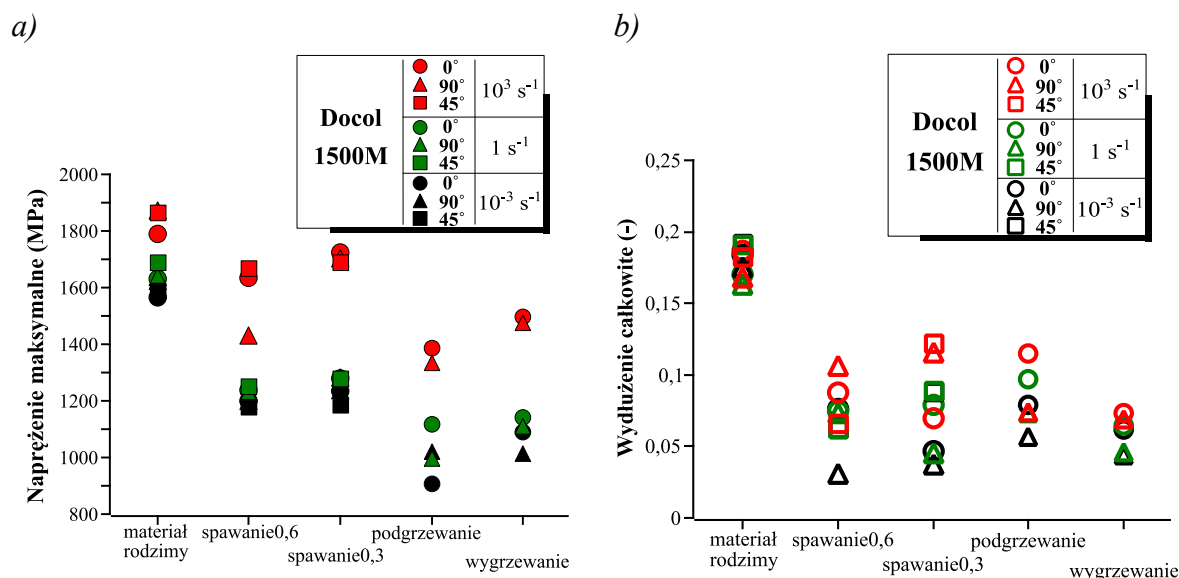
Z kolei, w przypadku obydwóch gatunków stali martenzytycznej, tj. Docol 1200M (rys. 94) i Docol 1500M (rys. 95) wytrzymałość próbek ze złączami spawanymi była niższa w porównaniu do wytrzymałości materiału niespawanego. Jest to odmienna reakcja mechaniczna w stosunku do wcześniej omawianych stali typu DP. W warunkach dynamicznych, stwierdzono wyraźnie wyższe wartości naprężenia maksymalnego próbek

spawanych o orientacji 0° względem kierunku wycinania dla obydwu gatunków stali. Ponadto, stale te wykazały podobny charakter zmian wydłużenia całkowitego dla rozpatrywanych typów złącz spawanych, jednak w przypadku stali Docol 1500M średnie wartości wydłużenia całkowitego były ok. 5% niższe.



Rys. 94. Wpływ warunków spawania na wartości naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 1200M

(Kolorem znacznika oznaczono poziom szybkości odkształcenia, geometrią - kierunek wycinania próbek)



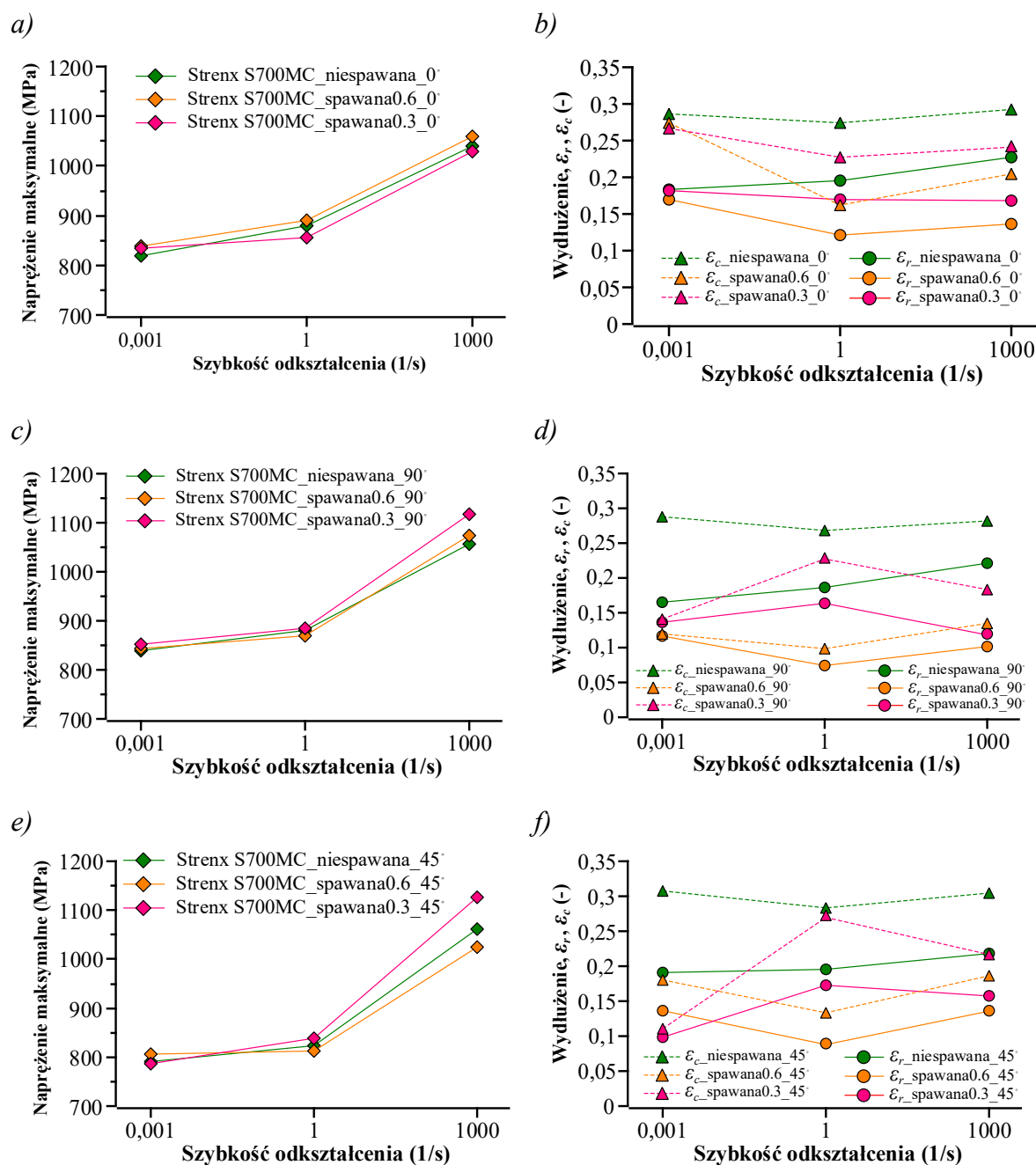
Rys. 95. Wpływ warunków spawania na wartości naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 1500M

(Kolorem znacznika oznaczono poziom szybkości odkształcenia, geometrią - kierunek wycinania próbek)

5.2. WPLYW SZYBKOSCI ODKSZTAŁCENIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ I CIĄGLIWOŚĆ ZŁĄCZ SPAWANYCH

Wpływ szybkości odkształcenia na uzyskiwaną wartość naprężeń maksymalnych oraz wydłużenie całkowite i równomierne przedstawiono na dwóch oddzielnych wykresach. Porównano na nich wpływ orientacji wycinania próbek materiałowych (0° , 90° , 45°) i warunków spawania na wytrzymałość mechaniczną. Wyniki badań wytrzymałościowych dla stali Strenx S700MC przedstawiono na rys. 96. Analizując zawarte na nim dane można zauważyć, że charakter zmian wartości naprężenia maksymalnego w funkcji szybkości odkształcenia jest niezależny od orientacji wycinania próbek. We wszystkich przypadkach zaobserwowano początkowo niewielki wzrost wytrzymałości dla szybkości odkształcenia 1 s^{-1} w stosunku do testów prowadzonych w warunkach quasi-statycznego obciążenia, natomiast wyraźny wzrost wytrzymałości (średnio ok. 200 MPa) odnotowano, gdy próbki były obciążone w sposób dynamiczny.

Interesujący z poznawczego punktu widzenia jest charakter zmian wartości wydłużenia w funkcji szybkości odkształcenia. Próbki spawane wiązką laserową o średnicy 0,3 mm wykazały odmienny charakter zmian wydłużenia dla orientacji wycinania 90° (rys. 96d) i 45° (rys. 96f) w stosunku do orientacji 0° (rys. 96b), gdyż wykazywały się one mniejszą ciągliwością (niska wartość wydłużenia) w warunkach szybkości odkształcenia 0,001 i 1 s^{-1} . Najniższą ciągliwość uzyskano dla próbek ze złączami spawanymi płamką procesową o średnicy 0,6 mm.

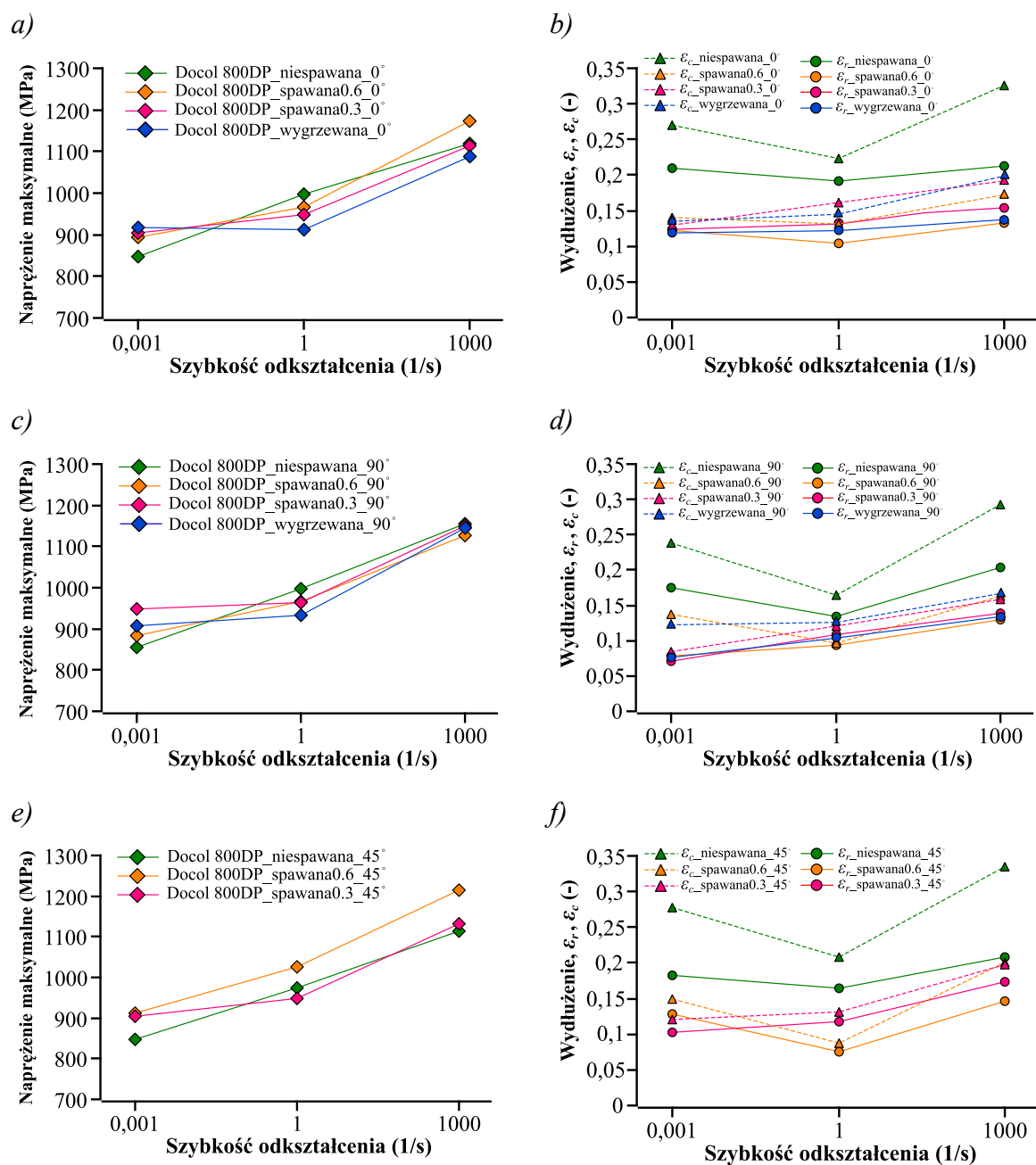


Rys. 96. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych wykonanych ze stali Strenx S700MC dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia

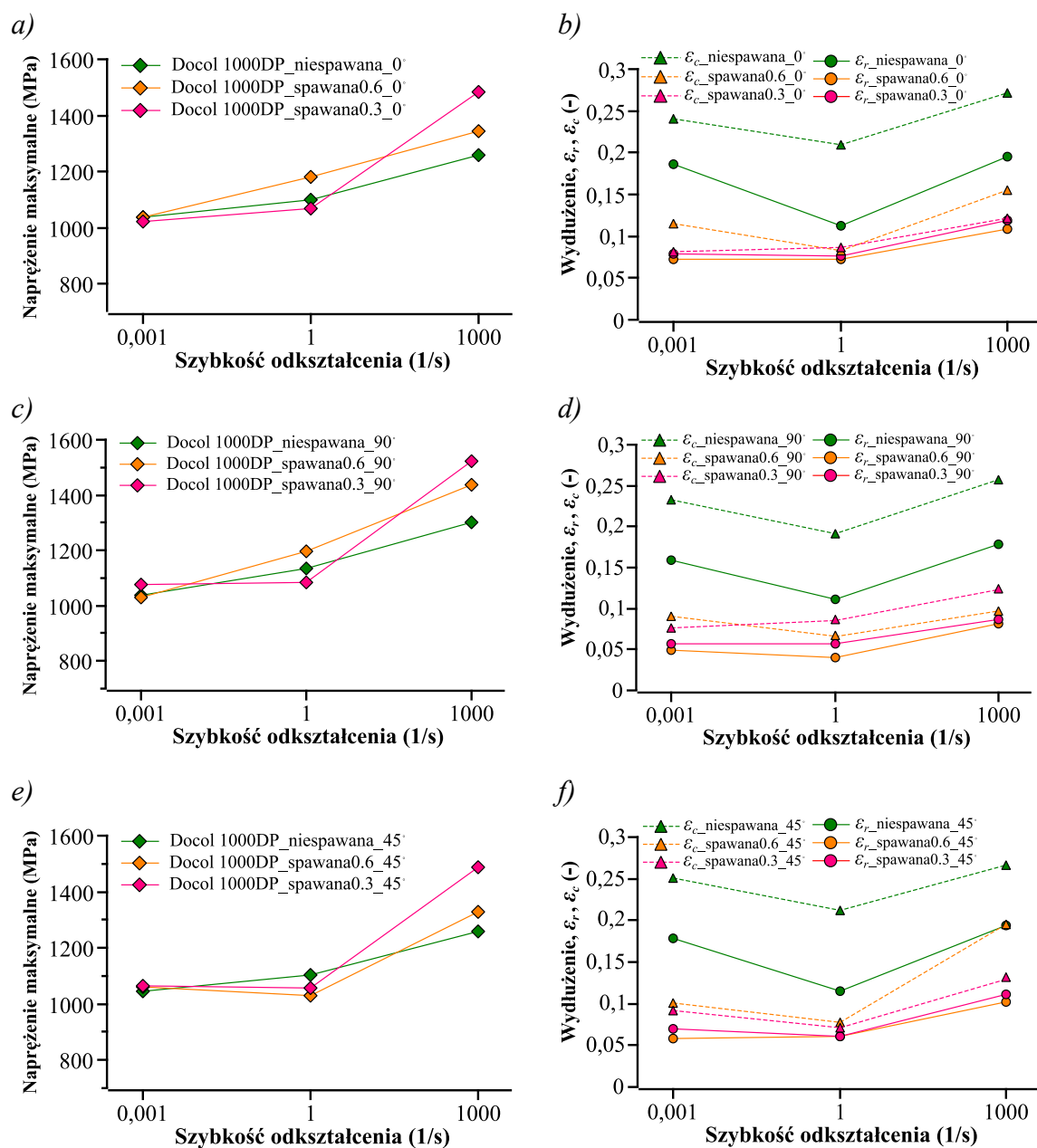
Wyniki badań próbek niespawanych wykonanych ze stali Docol 800DP (rys. 97) i Docol 1000DP (rys. 98) wykazały, że zależność pomiędzy naprężeniem maksymalnym a szybkością odkształcenia ma charakter zbliżony do liniowego. Podobny charakter stwierdzono również w przypadku złącz spawanych stali Docol 1000DP wykonanych płamką

procesową o średnicy 0,6 mm dla orientacji wycinania próbek 0° (rys. 98a) i 90° (rys. 98c). Badania pozostałych próbek ze złączami spawanymi również wykazały, że materiał złącz jest wrażliwy na szybkość odkształcenia, jednak wrażliwość ta jest niższa dla zakresu szybkości odkształcenia $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$ niż dla $1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$. Najwyższą wrażliwość na szybkość odkształcenia zaobserwowano dla złącz spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, wykonanych w stali Docol 1000DP dla wszystkich rozpatrywanych orientacji wycinania próbek (rys. 98a, c, e).

Wydłużenie równomierne oraz wydłużenie całkowite materiału rodzimego dla obydwu badanych gatunków stali DP było najniższe w warunkach średnich szybkości odkształcenia. Podobną zależność zaobserwowano dla próbek ze złączami spawanymi płamką procesową 0,6 mm, jednak nie ma ona aż tak wyraźnego charakteru. Interesujący jest fakt, że złącza wykonane wiązką laserową o średnicy 0,3 mm wykazały wysoką ciągliwość w warunkach dużych szybkości odkształcenia. Powodem tego zjawiska mógł być mniejszy udział strefy wtopienia i stref wpływu ciepła w proces deformacji próbki w porównaniu do udziału ww. stref w złączach wykonanych większą płamką procesową. Większość próbek ze złączami spawanymi wykazała większe wydłużenie podczas testów prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego niż w quasi-statycznego.



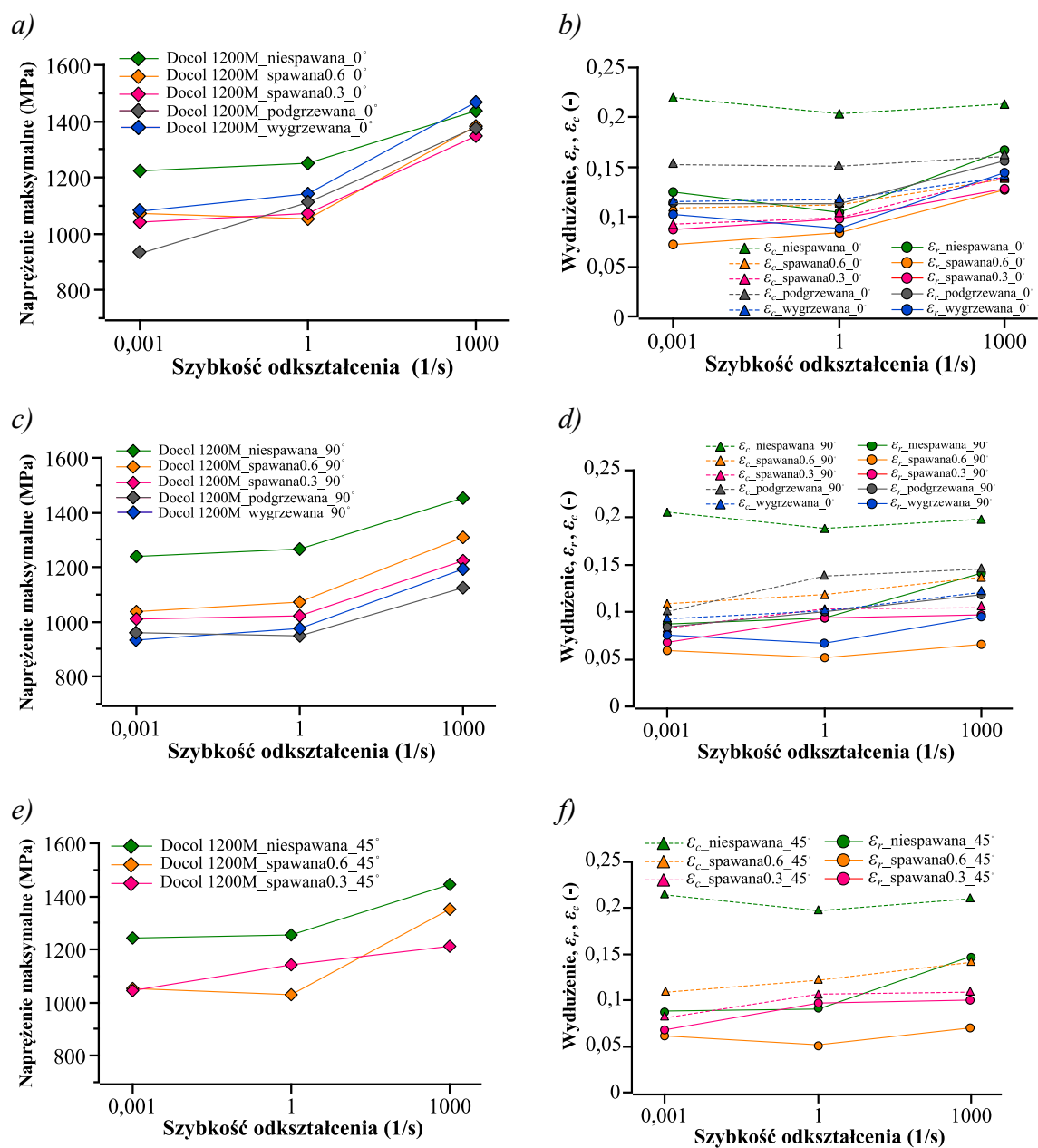
Rys. 97. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 800DP dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia



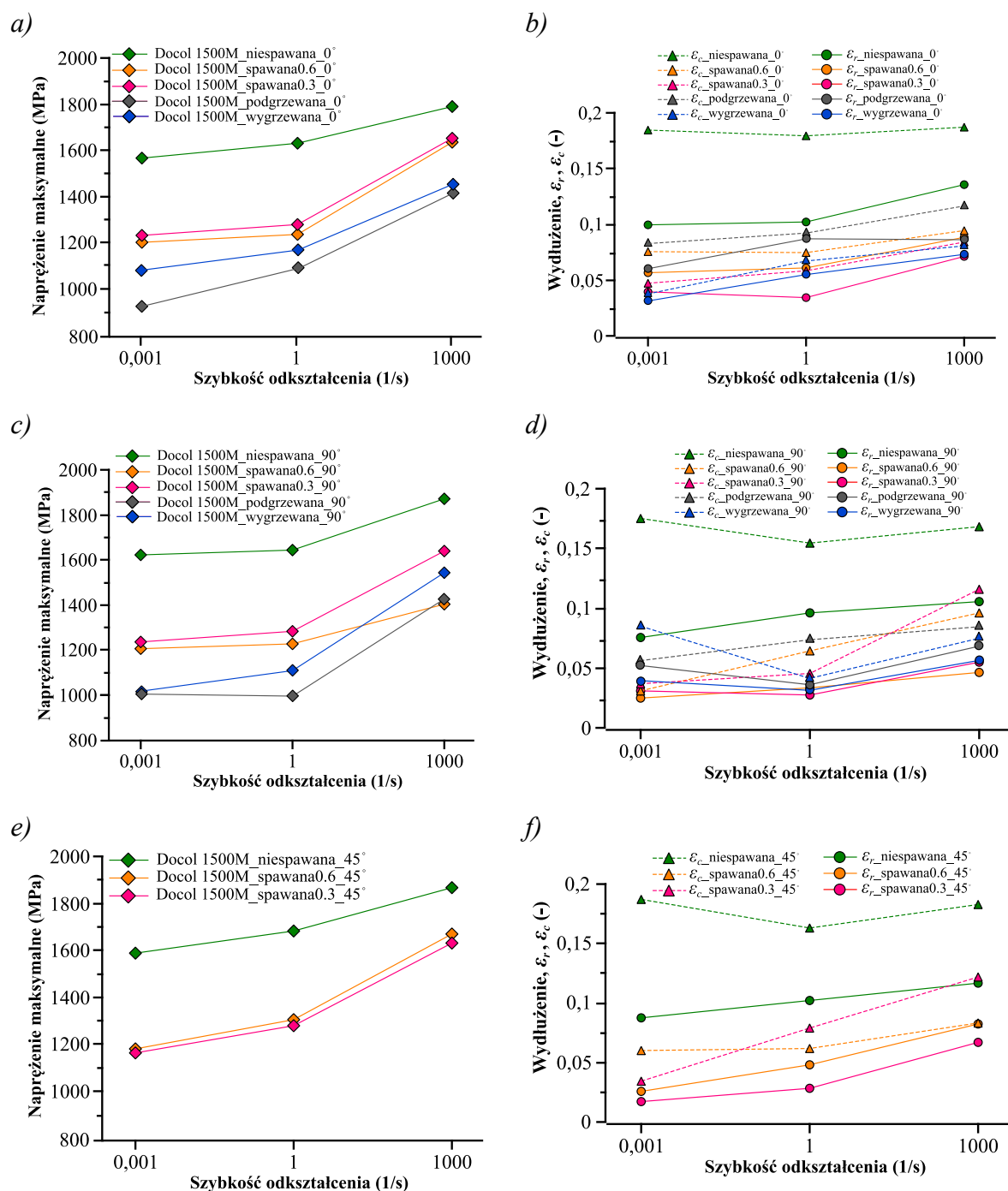
Rys. 98. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 1000DP dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia

Dla obydwu badanych stali martenzytycznych różnica w poziomach wartości naprężenia maksymalnego w zakresie szybkości odkształcenia $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$ była niewielka. Większą różnicę zaobserwowano w zakresie szybkości odkształcenia wynoszącej $1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$, w szczególności dla stali Docol 1500M. Ponadto, w przypadku stali Docol 1500M próbki podgrzewane i wygrzewane uzyskały najniższe wartości naprężenia maksymalnego dla

wszystkich rozpatrywanych poziomów szybkości odkształcenia. Wydłużenie próbek niespawanych ze stali martenzytycznych Docol 1200M i Docol 1500M w warunkach średnich i dużych szybkości odkształcenia było nieco niższe w stosunku do małych szybkości odkształcenia (zależność podobna do stwierdzonej w przypadku stali Strenx S700MC). Próbki ze złączami spawanymi wykazały natomiast niewielkie zmiany ciągliwości wraz ze zmianą poziomu szybkości odkształcenia. W większości przypadków testowanych próbek, najwyższe wartości wydłużenia otrzymano na podstawie danych z testów w warunkach obciążenia dynamicznego.



Rys. 99. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 1200M dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia



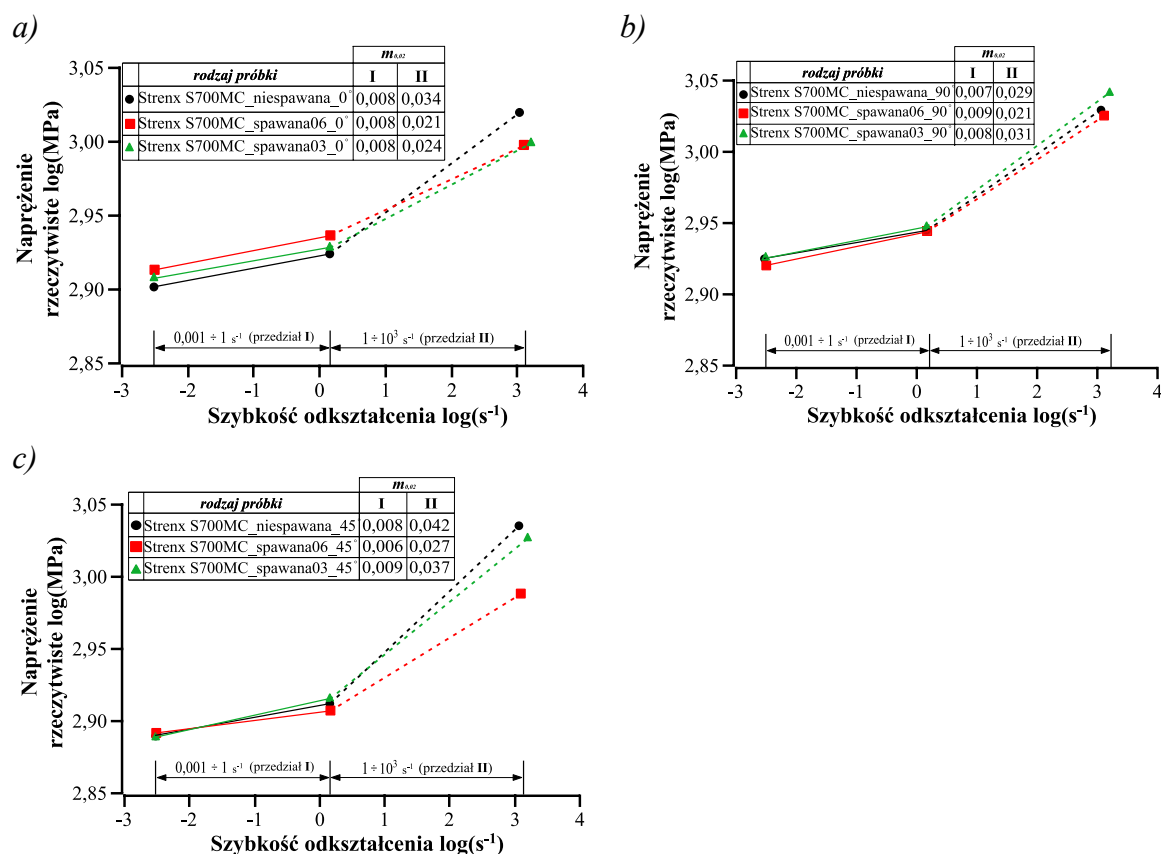
Rys. 100. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 1500M dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia

Aby ilościowo wyrazić wrażliwości badanych gatunków stali na szybkość odkształcenia, w tym także próbek materiałowych ze złączem spawanym, wyznaczono parametr wrażliwości m . Zgodnie z [121], wartość tego parametru wyraża kąta nachylenia

prostej wyznaczonej na podstawie regresji liniowej danych doświadczalnych zestawionych na wykresie w skali logarytmicznej naprężenie-szybkość odkształcenia ($\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$). Przyjęto, że do opracowania wykresu $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ zostaną użyte wartości naprężenia rzeczywistego odpowiadającego odkształceniu 0,02. Stąd w pracy parametr wrażliwości oznaczono symbolem $m_{0,02}$.

Wartości wrażliwości na szybkość odkształcenia obliczono dla dwóch przedziałów szybkości odkształcenia, tj. $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$ oraz $1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$. Analizy przeprowadzono dla próbek niespawanych oraz próbek ze złączami spawanymi. W tym miejscu należy zauważyć, że autor pracy jest świadomy, że wyznaczanie wrażliwości materiału próbek zawierających złącza spawane laserowo nie jest w pełni poprawnym podejściem. Jednakże ze względu na porównawczy charakter wykonywanych analiz, w których rozpatrywane są złącza spawane wykonane w próbkach o tej samej geometrii, zastosowane podejście dostarcza wielu informacji istotnych ze względu na wybór odpowiednich parametrów technologicznych spawania laserowego struktur energochłonnych o dużej zdolności do absorpcji energii mechanicznej.

Wartości parametru wrażliwości na szybkość odkształcenia dla stali Strenx S700MC zestawiono na rys. 101 dla wszystkich orientacji wycinania próbek ($0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$). W pierwszym przedziale ($0,001 \leq \dot{\epsilon} \leq 1 \text{ s}^{-1}$) materiał rodzimy, jak i złącza spawane charakteryzowały się wrażliwością na zbliżonym poziomie wynoszącym ($m_{0,02}=0,006 \div 0,009$). Znaczącą zmianę zaobserwowano w drugim badanym zakresie szybkości odkształcenia ($1 \leq \dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ s}^{-1}$). Parametr wrażliwości złączy spawanych wykonanych wiązką o plamce procesowej 0,6 mm dla wszystkich badanych orientacji wycinania był niższy w stosunku do materiału rodzimego i dla orientacji 0° , wyniósł $m_{0,02} = 0,021$. Z kolei, złącza spawane wiązką laserową o mniejszej średnicy wykazały wrażliwość zbliżoną do materiału rodzimego. Najwyższą wartość parametru $m_{0,02} = 0,037$ uzyskano dla orientacji wycinania próbek 45° .

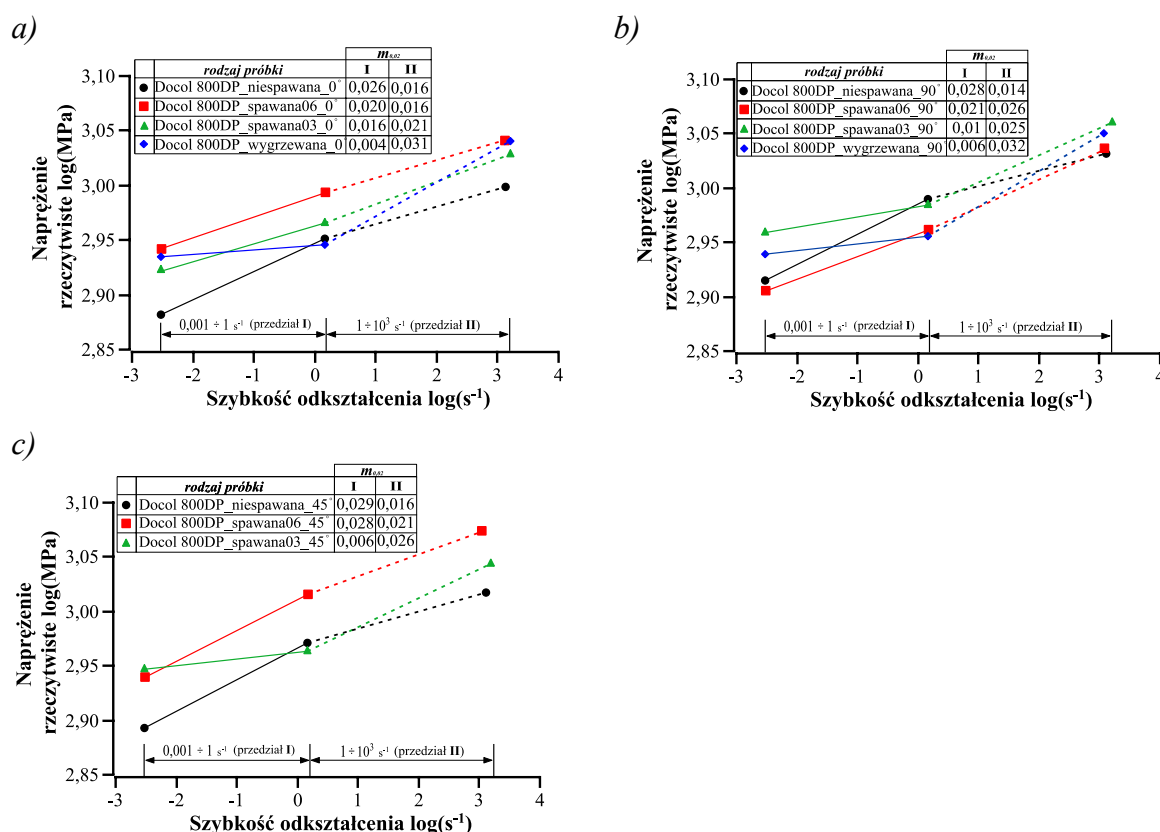


Rys. 101. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złączy spawanych wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wartości parametru $m_{0,02}$ zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I ($0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$) oraz II ($1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$)

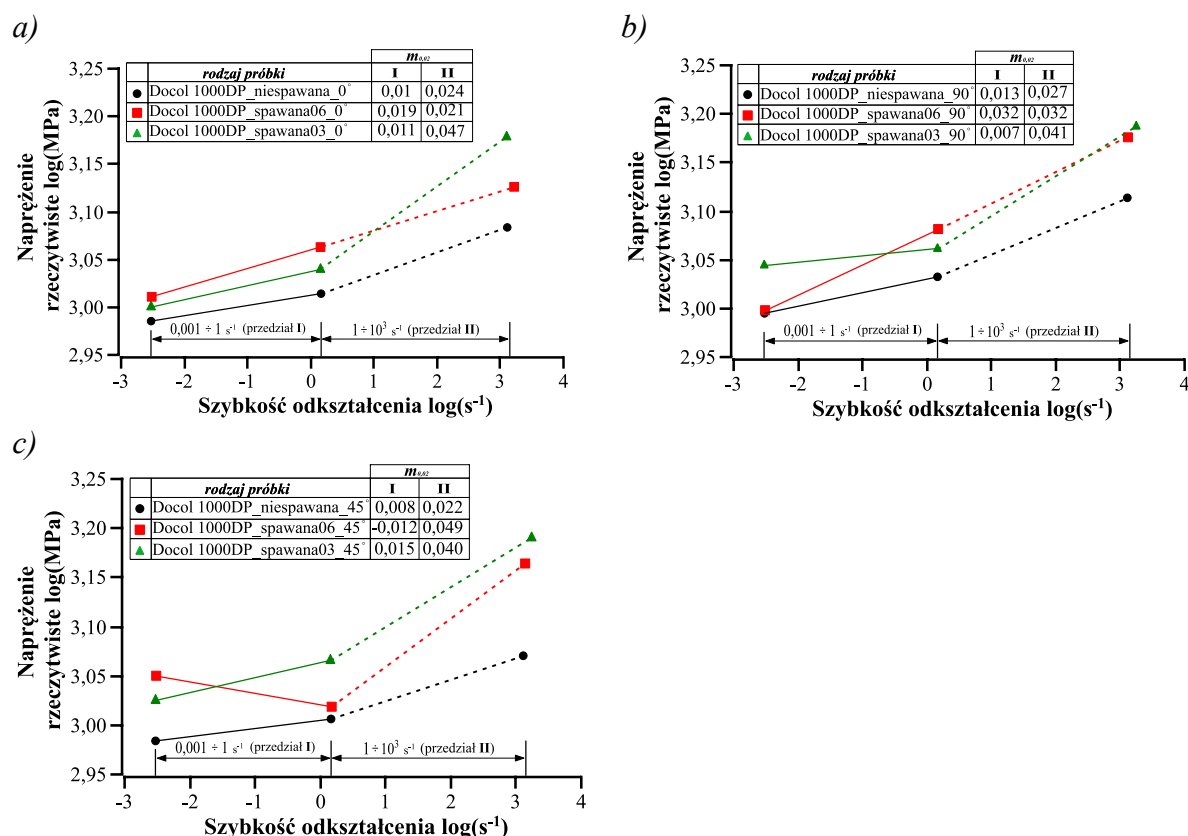
W stosunku do stali S700MC, stal Docol 800DP (rys. 102) wykazała odmienny charakter zmiany wrażliwości na szybkość odkształcenia. Stal ta - niespawana - wykazała najwyższą wrażliwość na szybkość odkształcenia ($m_{0,02} = 0,026 \div 0,029$) ze wszystkich badanych gatunków stali w pierwszym badanym zakresie szybkości odkształcenia, niezależnie od orientacji wycinania próbek. Natomiast, w przypadku rozpatrywanych typów złączy spawanych wykonanych ze stali Docol 800DP, ich wrażliwość była niższa w porównaniu do materiału rodzimego. W tym miejscu warto podkreślić, że wrażliwość złączy spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm była niższa w stosunku do złączy wykonanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm. Ponadto, złącza te charakteryzowały się większą wrażliwością w pierwszym z rozpatrywanych zakresów względem drugiego, niezależnie od rozpatrywanych orientacji wycinania próbek. Najniższą wrażliwość na szybkość odkształcenia w pierwszym badanym zakresie zaobserwowano dla próbek ze złączami wygrzewanymi po procesie spawania.

W drugi rozpatrywanym zakresie szybkości odkształcenia, złącza wykonane ze stali Docol 800DP wykazywały wzrost wrażliwości dla wszystkich badanych typów złączy spawanych w porównaniu do materiału rodzimego. Najwyższe wartości $m_{0,02}$ uzyskano dla próbek ze złączami wygrzewanymi po spawaniu, odpowiednio 0,031 i 0,032 dla orientacji 0° i 90° . Drugi materiał z grupy stali dwufazowych (Docol 1000DP) wykazał się odmiennym charakterem zmian parametru $m_{0,02}$ niż Docol 800DP, tj. niższą wrażliwością w pierwszym zakresie szybkości odkształcenia w stosunku do drugiego. Podobnymi wartościami $m_{0,02}$ cechowały się złącza wykonane wiązką laserową o średnicy 0,6 mm dla próbek o orientacji 0° i 90° , jednakże dla orientacji 45° zaobserwowano ujemną wrażliwość na szybkość odkształcenia ($m_{0,02} = -0,012$) w zakresie quasi-statycznych szybkości odkształcenia.

Wartości parametru $m_{0,02}$ dla materiału próbki ze złączami spawanymi 0,3 mm charakteryzowały się małym rozrzutem w stosunku do próbek ze złączami wykonanymi większą średnicą wiązki laserowej. Ponadto, materiał złącza spawanego 0,3 mm wykazywał najwyższą wrażliwość na szybkość odkształcenia w drugim zakresie szybkości odkształcenia.

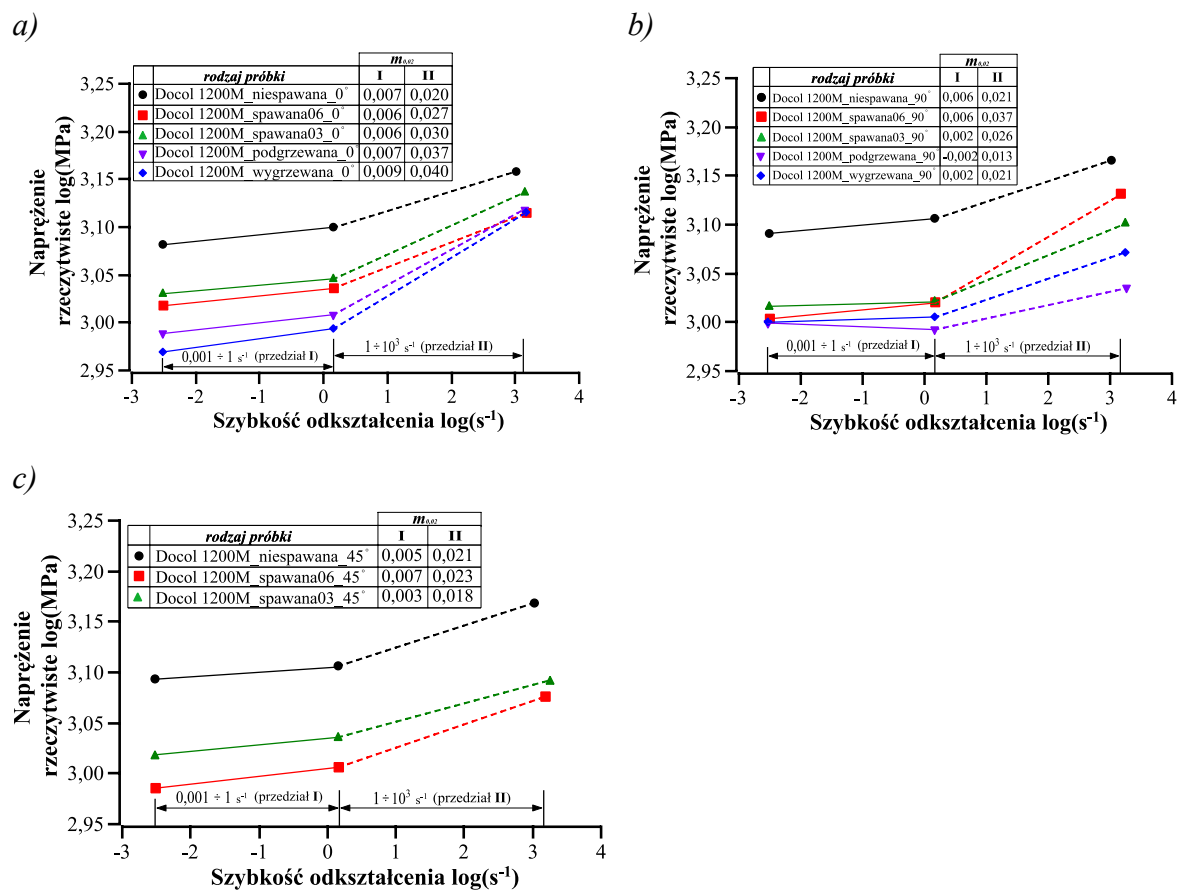


Rys. 102. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złączy spawanych wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I ($0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$) oraz II ($1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$)

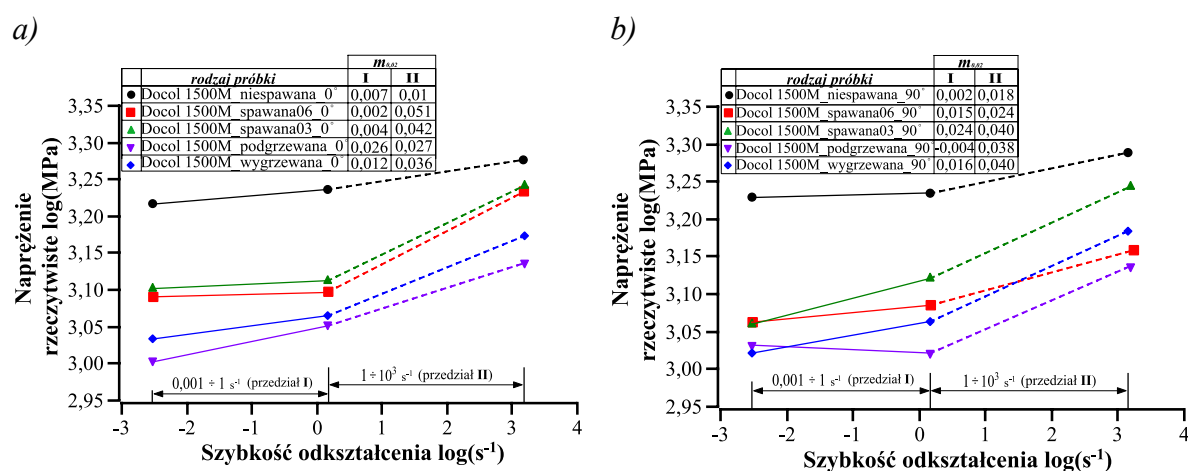


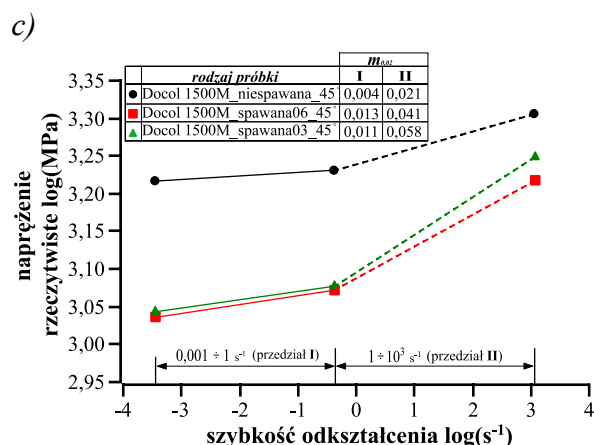
Rys. 103. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złącz spawanych wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I ($0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$) oraz II ($1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$)

W przypadku stali Docol 1200M i Docol 1500M stwierdzono niższą wrażliwość na szybkość odkształcenia w pierwszym z rozpatrywanych przedziałów szybkości odkształcenia. Charakter ten zaobserwowano dla wszystkich badanych typów złącz spawanych oraz orientacji wycinania próbek materiałowych. W pierwszym zakresie szybkości odkształcenia obydwa materiały charakteryzowały się najniższą wrażliwością na szybkość odkształcenia ze wszystkich badanych materiałów. Stal Docol 1200M, natomiast, charakteryzowała się większą powtarzalnością uzyskiwanych wyników dla wszystkich badanych typów złącz spawanych w stosunku do złącz wykonanych ze stali Docol 1500M. Dla II zakresu szybkości odkształcenia, obydwa gatunki stali wykazały wyraźnie różne wartości parametru $m_{0,02}$ w zależności od typu złącza spawanego oraz orientacji wycinania próbek materiałowych. Próbkę podgrzewane przed spawaniem wykonane ze stali Docol 1200M i Docol 1500M dla orientacji wycinania 90° charakteryzowały się ujemną wrażliwością na szybkość odkształcenia w I zakresie, co świadczy o znaczącym wpływie anizotropowości materiału na wartość $m_{0,02}$.



Rys. 104. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materialu rodzimego oraz złączy spawanych wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I ($0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$) oraz II ($1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$)





Rys. 105. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złączy spawanych wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I ($0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$) oraz II ($1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$)

5.3. ENERGOCHŁONNOŚĆ MECHANICZNA NIESPAWANYCH I SPAWANYCH PRÓBEK MATERIAŁOWYCH

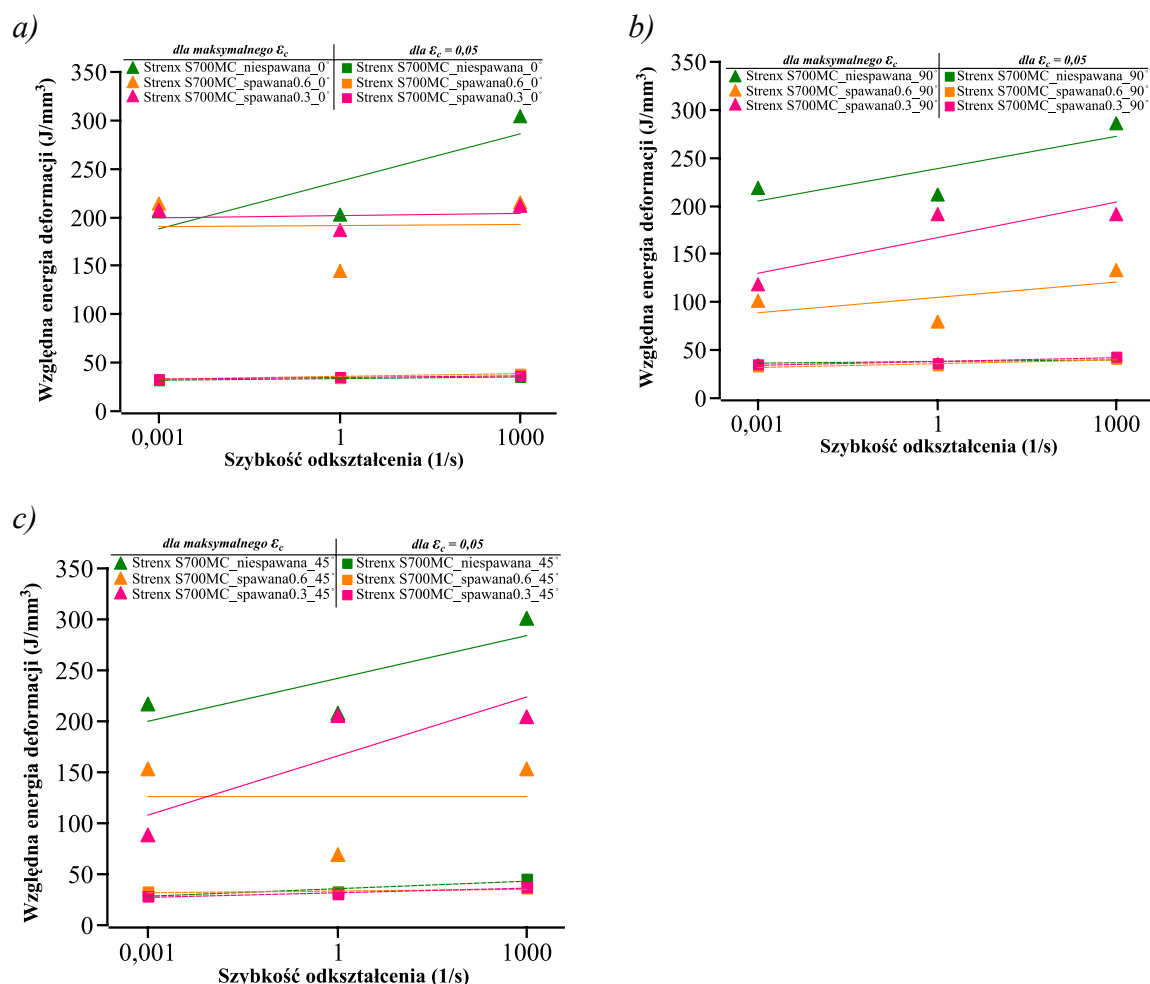
Do oceny energochłonności próbek spawanych i niespawanych wykorzystano parametr względnej energii deformacji E_{wd} , którą graficznie przedstawia pole powierzchni pod krzywą napężenie – wydłużenie. Ze względu na to, że w niektórych zastosowaniach struktur energochłonnych, materiał struktury nie odkształca się aż do chwili, w której następuje rozerwanie materiału, a jedynie do pewnego ograniczonego zakresu. W związku z tym, wartość energii deformacji wyznaczono dla zakresu odkształcenia stanowiącego 5% wartości odkształcenia całkowitego.

Stale Strenx S700MC i Docol 800DP wykazały zbliżone wartości względnej energii deformacji ($30 - 40 \text{ J/mm}^3$) dla 5% wydłużenia całkowitego. W przypadku stali Docol 1000DP stwierdzono nieznacznie wyższe wartości E_{wd} , zwłaszcza dla średnich i dużych szybkości odkształcenia. Pozostałe badane materiały, tj. Docol 1200M i Docol 1500M charakteryzowały się wyższym wskaźnikiem energochłonności mechanicznej, której wartości zbliżona była do 50 J/mm^3 dla próbek niespawanych. Generalnie, próbki ze złączami spawanymi wykazały niższe wartości energii deformacji niż próbki niespawane.

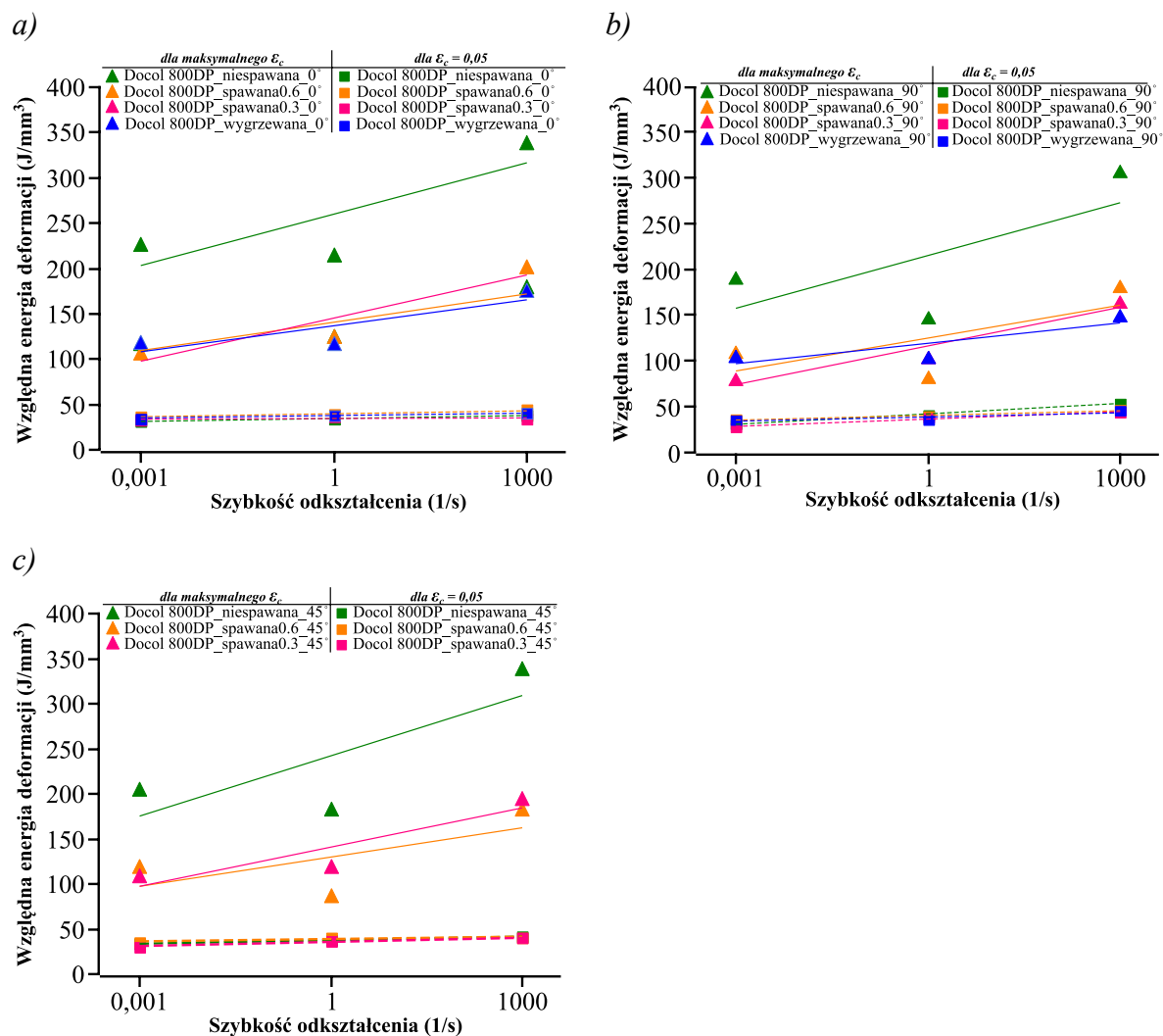
Dla maksymalnego wydłużenia, najwyższą wartość energii deformacji ($200-213 \text{ J/mm}^3$), w zakresie dużych szybkości odkształcenia, wykazały próbki ze złączami spawanymi wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, wykonane ze stali Strenx S700MC. W przypadku stali

typu DP wartości E_{wd} były nieco niższe i wyniosły 161-200 dla stali Docol 800DP i 155-210 J/mm³ dla stali Docol 1000DP. Natomiast, dla stali 1200M poziom energii deformacji nie przekroczył wartości 170 J/mm³. Największe różnice pomiędzy wartościami energii deformacji pomiędzy próbkami ze złączami spawanymi wiązkami 0,3 mm i 0,6 mm wykazała stal Strenx S700MC dla orientacji 90° i 45° oraz Docol 1500M dla orientacji 45°. Dla pozostałych badanych stali nie zaobserwowano aż tak znaczących różnic.

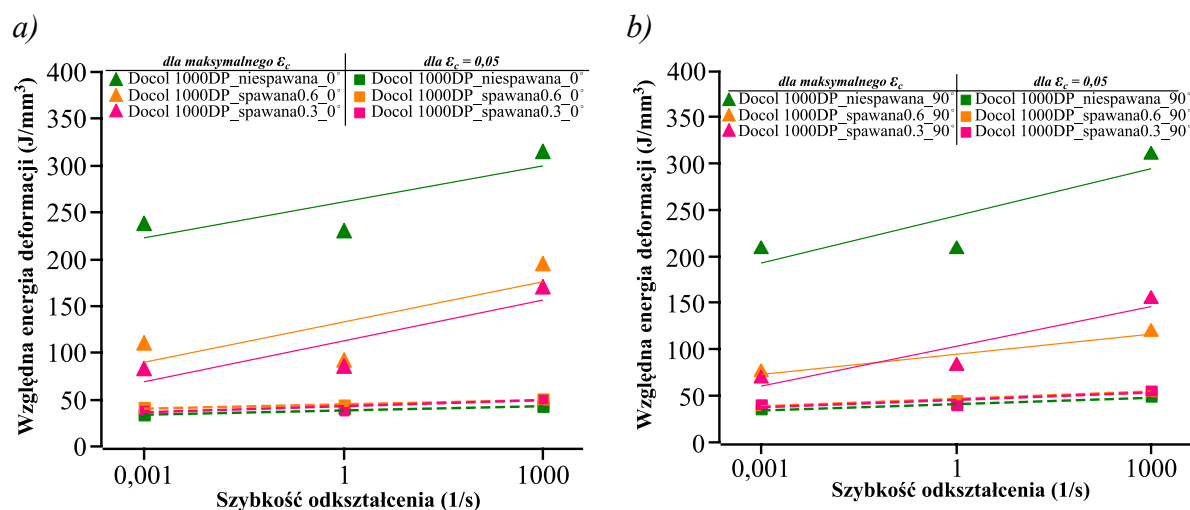
W przypadku energii deformacji obliczanej dla maksymalnego wydłużenia całkowitego stwierdzono, że dla większości badanych próbek wraz ze wzrostem wartości naprężenia plastycznego dla danego gatunku stali zmniejsza się różnica pomiędzy wartością energii dla małego i dużego poziomu szybkości odkształcenia. Najmniejszą różnicę zaobserwowano dla stali Docol 1500M.

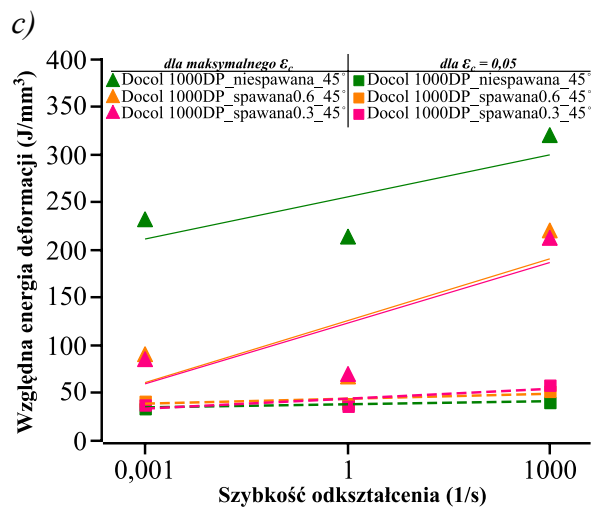


Rys. 106. Względna energia deformacji złącz spawanych oraz materiału rodzimego stali Strenx S700MC dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)

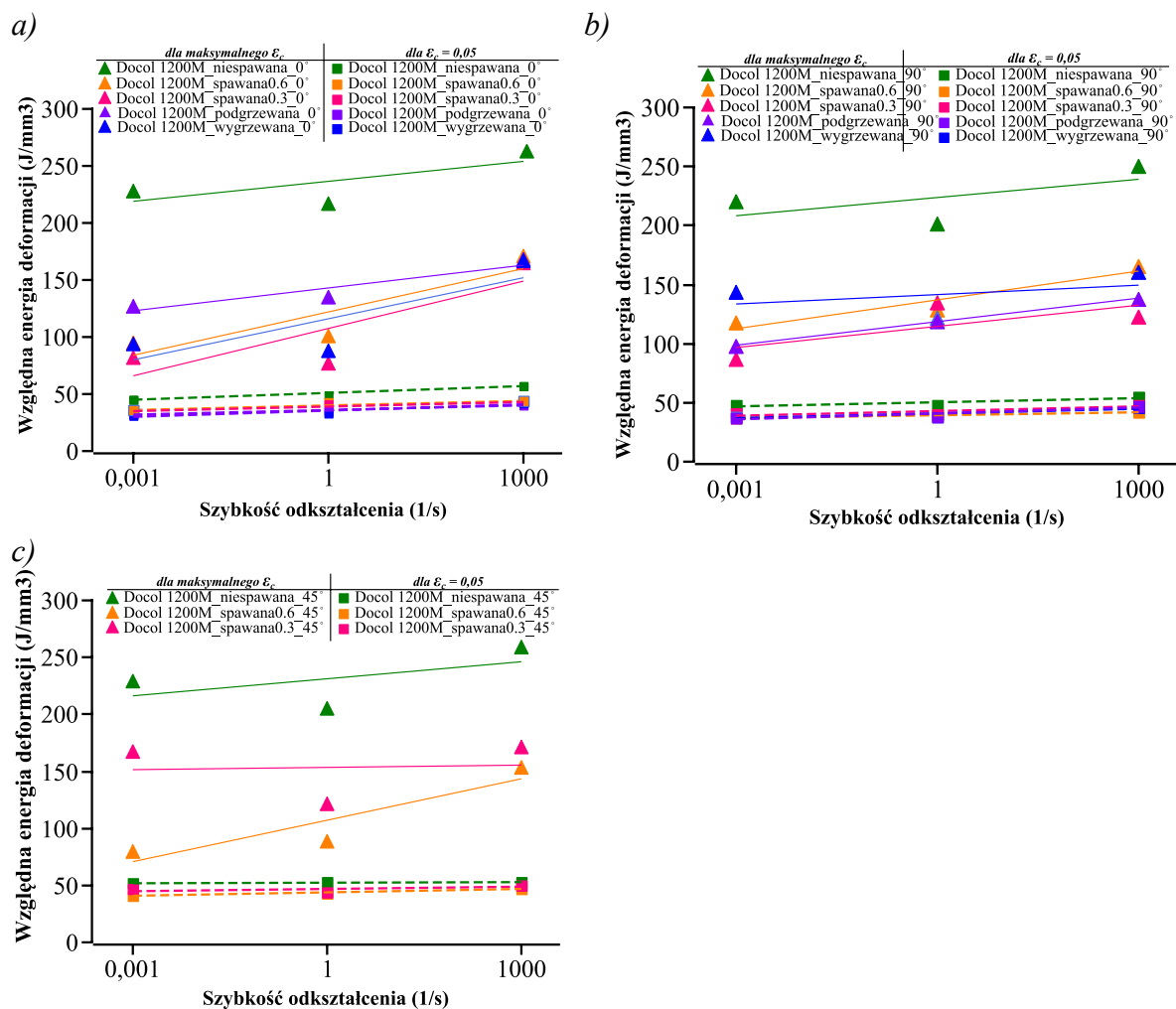


Rys. 107. Względna energia deformacji złączy spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 800DP dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)

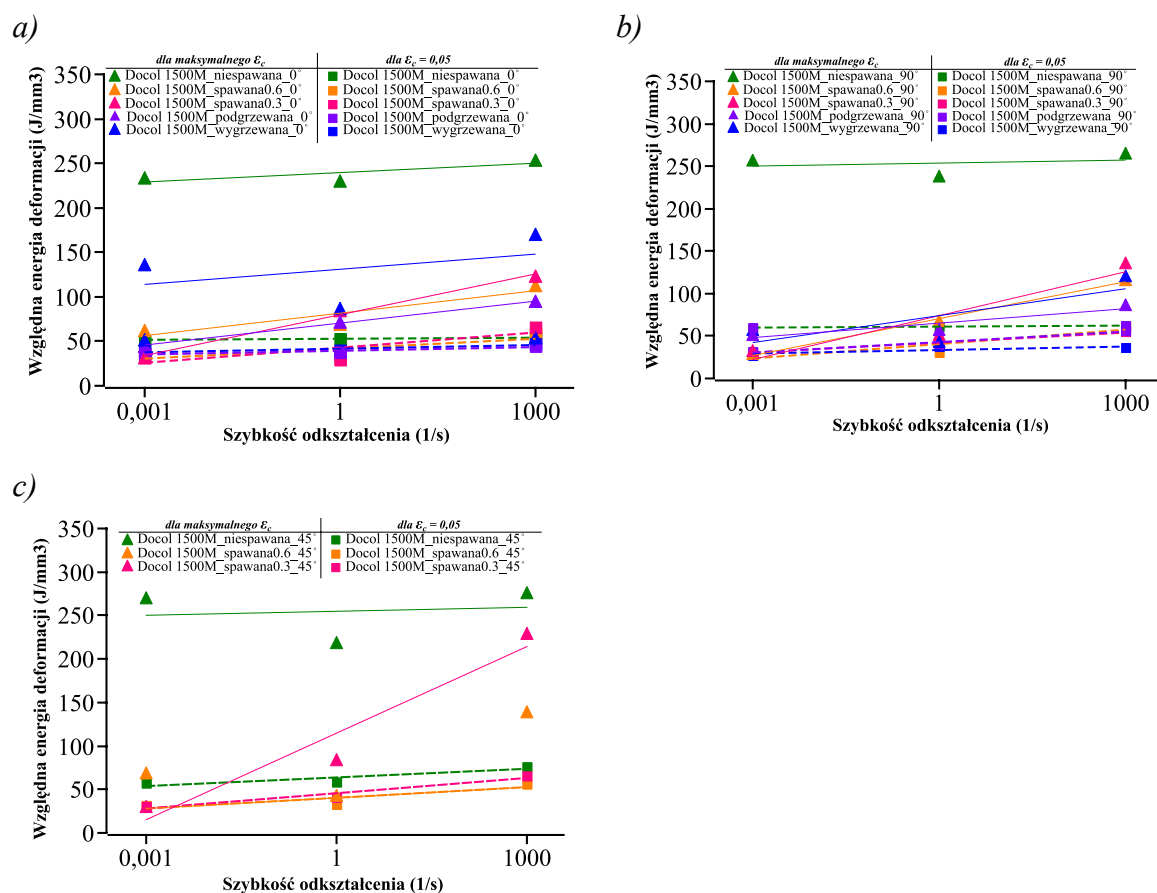




Rys. 108. Względna energia deformacji złączy spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 1000DP dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)



Rys. 109. Względna energia deformacji złączy spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 1200M dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)



Rys. 110. Względna energia deformacji złączy spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 1500M dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)

5.4. PODSUMOWANIE ANALIZY WYNIKÓW

Materiał niespawany

Wszystkie badane gatunki stali wykazały dodatnią wrażliwość na szybkość odkształcenia. Najmniejszy wpływ szybkości odkształcenia na wytrzymałość mechaniczną testowanych materiałów stwierdzono w pierwszym zakresie szybkości odkształcenia ($0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$) dla stali Strenx S700MC oraz Docol 1500M i Docol 1200M. Przyczyną obniżenia wrażliwości mechanicznej w przypadku stali Strenx S700MC są dodatki stopowe takie, jak: fosfor, mangan oraz krzem, które znacząco obniżają wpływ szybkości odkształcenia na wytrzymałość mechaniczną w stalach ferrytycznych. Stale martenzytyczne są mniej wrażliwe na szybkość odkształcenia ze względu na wysoką twardość struktury martenzytycznej. Struktura ta wykazuje bardziej atermiczny charakter związany z ruchem dyslokacji niż

w przypadku struktury ferrytycznej, występującej w stalach DP [122]. Wymienione wyżej stale wykazały również zbliżony charakter zmian wydłużenia względem szybkości odkształcenia – niewielki spadek wytrzymałości mechanicznej dla średnich i dużych szybkości odkształcenia w stosunku do obciążenia o charakterze quasi-statycznego. Odmienne zachowanie stwierdzono w przypadku obydwu gatunków stali DP, dla których najniższe wartości wydłużenia obserwowano dla średniego poziomu szybkości odkształcenia. Ponadto, wrażliwość na szybkość odkształcenia stali Docol 800DP w przedziale $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$ była wyższa niż w $1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Złącza spawane wiązką laserową o średnicy 0,6 mm

Złącza wykonane z wykorzystaniem plamki procesowej o średnicy 0,6 mm dla stali Strenx S700MC, Docol 1200M, Docol 1500M wykazały zbliżony charakter zmian wrażliwości na szybkość odkształcenia. Dla zakresu quasi-statycznego były to wartości niższe niż w zakresie szybkości odkształcenia $1 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$. Wyjątkiem jest stal Docol 800DP, w przypadku której stwierdzono podobne wartości wskaźnika $m_{0,02}$ dla obu badanych zakresów szybkości odkształcenia. Stal Docol 1000DP wykazała ten sam charakter wrażliwości dla orientacji wycięcia próbek 0° i 90° . Z kolei, złącza o orientacji 45° wykazały ujemną wrażliwość na szybkość odkształcenia ($m_{0,02} = -0,012$).

Złącza spawane wiązką laserową o średnicy 0,3 mm

Złącza wykonane plamką procesową o średnicy 0,3 mm, wykonane we wszystkich rozpatrywanych stalach wykazały dodatnią wrażliwość na szybkość odkształcenia. W warunkach średnich i dużych szybkości odkształcenia złącza te cechowały wyższe wartości względnej energii deformacji w stosunku do złącz wykonanych wiązką o średnicy 0,6 mm dla stali Strenx S700MC. W stalach dwufazowych nie zaobserwowano znaczących różnic dla złącz wykonanych plamką procesową o średnicy 0,3 mm.

Złącza podgrzewane przed spawaniem

Badania złącz spawanych z wcześniejszym podgrzaniem materiału przeprowadzono wyłącznie dla obydwu gatunków stali martenzytycznych, dla próbek wyciętych pod kątem 0° i 90° względem kierunku walcowania materiału. Na podstawie uzyskanych wyników badań,

stwierdzono efekt osłabienia materiału wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia (ujemna wrażliwość na szybkość odkształcenia) w zakresie $0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$ dla złącz wyciętych pod kątem 90° . Świadczy to o znaczącym wpływie orientacji kierunku wycinania próbek materiałowych na wartość parametru $m_{0,02}$.

Złącza wygrzewane po spawaniu

Badania połączeń spawanych z dodatkowym wygrzewaniem złącza rozogniskowaną wiązką laserową zrealizowano dla stali Docol 800DP, Docol 1200M oraz Docol 1500M dla równoległego i prostopadłego kierunku wycinania próbek względem orientacji walcowania blachy. Wszystkie badane złącza wykazały dodatnią wrażliwość na szybkość odkształcenia. Ponadto, badane połączenia spawane charakteryzowały się większą powtarzalnością uzyskiwanych wyników w stosunku do złącz podgrzewanych przed spawaniem.

ROZDZIAŁ 6

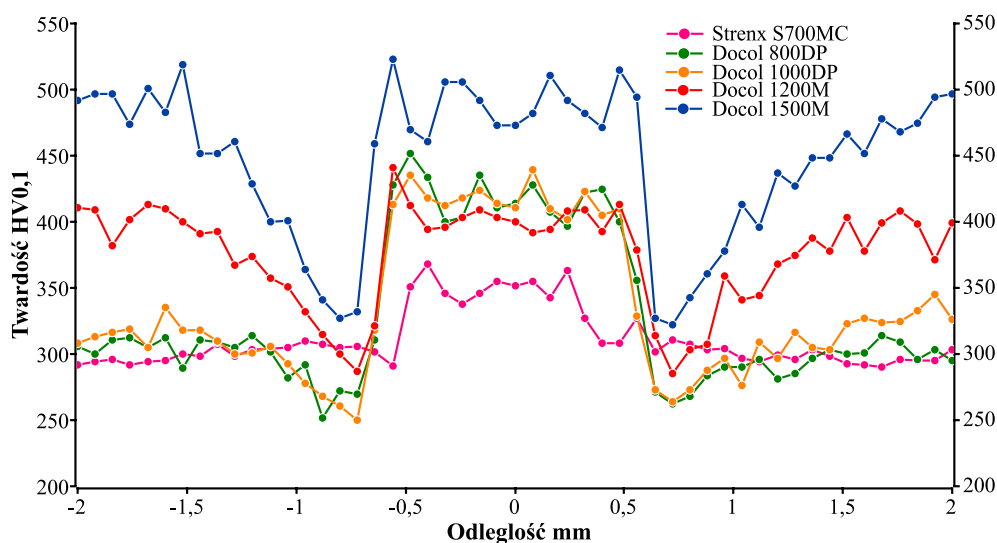
BADANIA MINIATUROWYCH ABSORBERÓW ENERGII

MECHANICZNEJ

W rozdziale przedstawiono wyniki zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych z blach łączonych z użyciem metody spawania laserowego. W pierwszym podrozdziale zestawiono wyniki rozkładów mikrotwardości złącz spawanych przed wykonaniem testów wytrzymałościowych. W kolejnych podrozdziałach omówiono wyniki testów mechanicznych w których analizowano odpowiedź mechaniczną konstrukcji absorberów w warunkach obciążenia quasi-statycznego oraz dynamicznego.

6.1. OCENA MIKROTWARDOŚCI ZŁĄCZ SPAWANYCH W MINIATUROWYCH ABSORBERACH ENERGII MECHANICZNYCH

W celu oceny jakości wykonania złącz spawanych w miniaturowych absorberach energii mechanicznej dokonano pomiaru rozkładu mikrotwardości w złączu spawanym laserowo dla pięciu badanych gatunków stali. Wyniki tych pomiarów zestawiono na rys. 111. Największą strefę przetopienia zaobserwowano dla stali Strenx S700MC wynoszącą ok. 0,6 mm, najszerszą zaś dla stali Docol 1500M – 1,1 mm. Stal Strenx S700MC wykazała również najniższą wrażliwość na ciepło dostarczone podczas spawania, tj. twardość nieznacznie spadła w SWC oraz wzrosła do ok. 350 HV w strefie wtopienia. Stale dwufazowe (Docol 800DP i 1000DP) oraz Docol 1200M wykazały zbliżony poziom twardości w strefie wtopienia (ok. 415 HV), jednak w przypadku stali DP zaobserwowano największy spadek twardości w strefie wpływu ciepła (ok. 250 HV). W przypadku obu stali martenzytycznych stwierdzono zbliżone wartości twardości w strefie wtopienia w stosunku do materiału rodzimego oraz największe spadki twardości w SWC do 290 HV i 320 HV, odpowiednio dla stali Docol 1200M i Docol 1500M. Przypuszcza się, że opisane spadki mikrotwardości w SWC złączy spawanych ze stali martenzytycznych mogą niekorzystnie wpłynąć na stabilność przebiegu procesu zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej w stosunku do złącz wykonanych z pozostałych badanych gatunków stali.



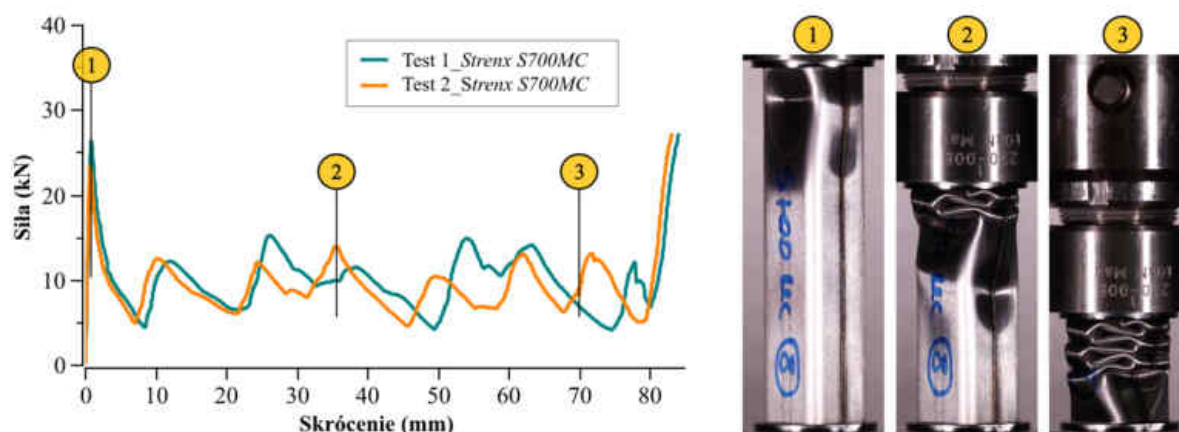
Rys. 111. Rozkłady mikrotwardości złącz spawanych laserowo wykorzystywanych w miniaturowych absorberach energii wykonanych ze stali: Strenx S700M, Docol 800DP, Docol 1000DP, Docol 1200M i Docol 1500M

6.2. TESTY ZGNIATANIA ABSORBERÓW W WARUNKACH OBCIĄŻENIA QUASI-STATYCZNEGO

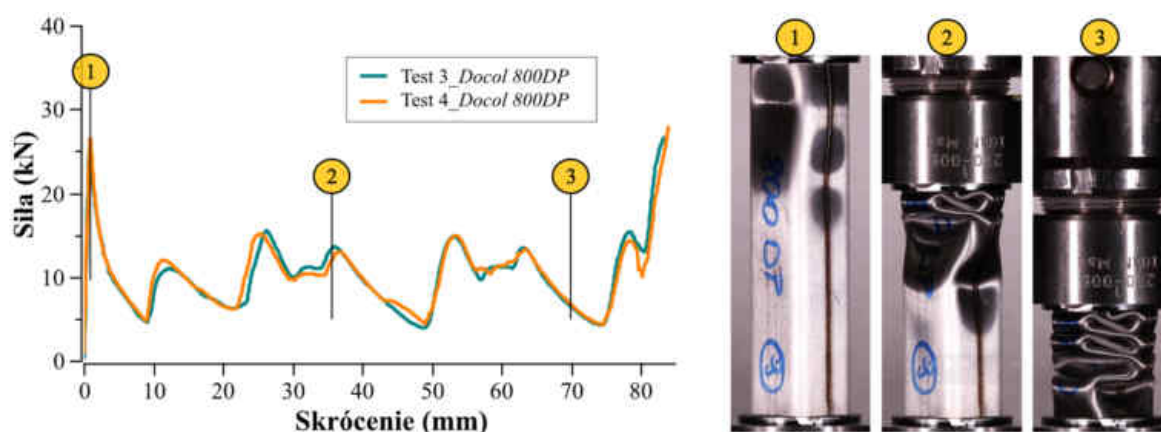
W wyniku przeprowadzonych testów zgniatania w warunkach obciążenia quasi-statycznego uzyskano krzywe zgniatania (zależność siły zgniatania w funkcji skrócenia). Wyniki dla poszczególnych rodzajów materiałów zastosowanych do wykonania miniaturowych absorberów energii przedstawiono kolejno na wykresach, ze stali Strenx S700MC (rys. 112), Docol 800DP (rys. 113), Docol 1000DP (rys. 114), Docol 1200M (rys. 115), Docol 1500M (rys. 116). Charakterystyki mechaniczne absorberów wyznaczono na podstawie zmodyfikowanych krzywych zgniatania, które zostały wygładzone z użyciem programu *SciDAVis* poprzez usunięcie szumów pomiarowych powstających podczas eksperymentu.

Na podstawie ww. krzywych oraz na podstawie analizy filmów będących efektem rejestracji procesu zgniatania miniaturowych absorberów stwierdzono, że w chwili kontaktu czołowej części uchwytu z próbką, spawane ściany absorbera z inicjatorami zgniotu odkształcały się na zewnątrz, zaś ściany bez spoiny do wewnątrz. Pierwszy widoczny wzrost siły oznaczony na wykresie indeksem (1) to siła zniszczenia, która dla stali Strenx S700MC, Docol 800DP i Docol 1000DP zmieniała się w zakresie od 24 do 27 kN. W przypadku stali martenzytycznych wartości siły były wyższe i wyniosły odpowiednio 34 kN dla stali Docol

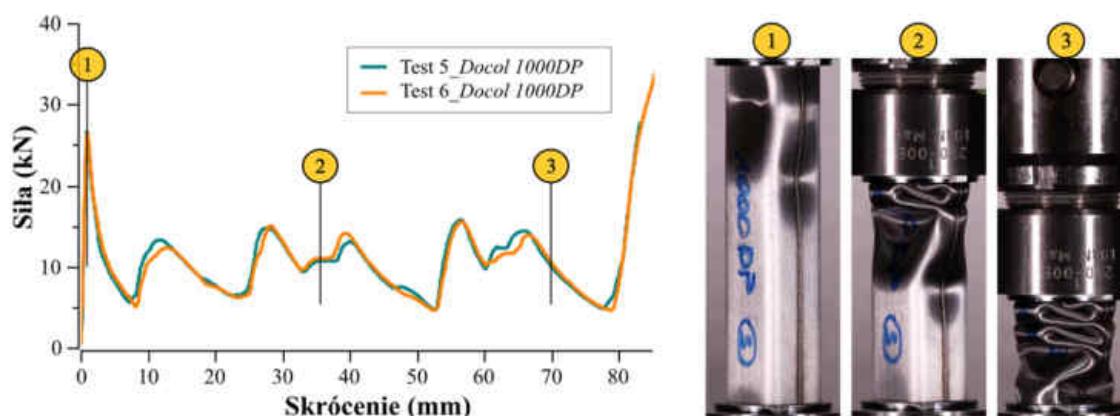
1200M i 38 kN dla stali Docol 1500M. Kolejne, lokalne skoki siły odpowiadały tworzeniu się kolejnych par fałd. W przypadku obydwu analizowanych stali martenzytycznych wartości lokalnych maksimum siły nie przekroczyły granicy 24 kN, zaś dla pozostałych materiałów wartość ta wyniosła jedynie 16 kN. Szlifowane powierzchnie absorberów oraz zastosowanie odpowiednio ukierunkowanego oświetlenia, sprzyjającego powstawaniu cieni na ścianach absorbera, umożliwiło wyraźną obserwację procesu tworzenia się fałd na obu ściankach absorbera podczas jego zgniatania. Na etapie występowania siły zniszczenia zaobserwowano, że wraz ze wzrostem wytrzymałości stali zwiększa się również rozmiar powierzchni deformacji. Efekt ten jest szczególnie widoczny podczas zgniatania absorberów wykonanych ze stali Docol 1500M, gdzie zaobserwowano rozpoczęcie procesu tworzenia się fałd na ściankach absorbera prawie na całej jego długości, już w chwili osiągnięcia siły zniszczenia (1).



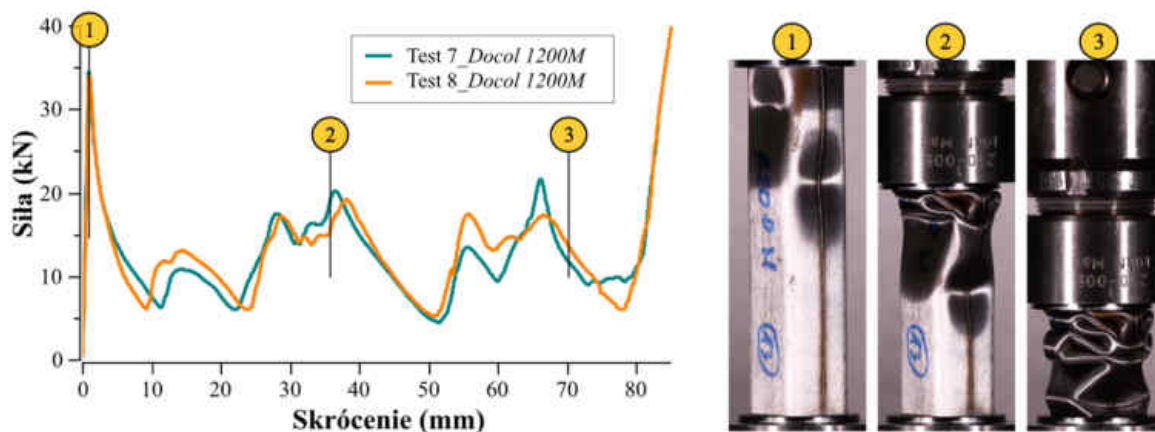
Rys. 112. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Strenx S700MC w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3)



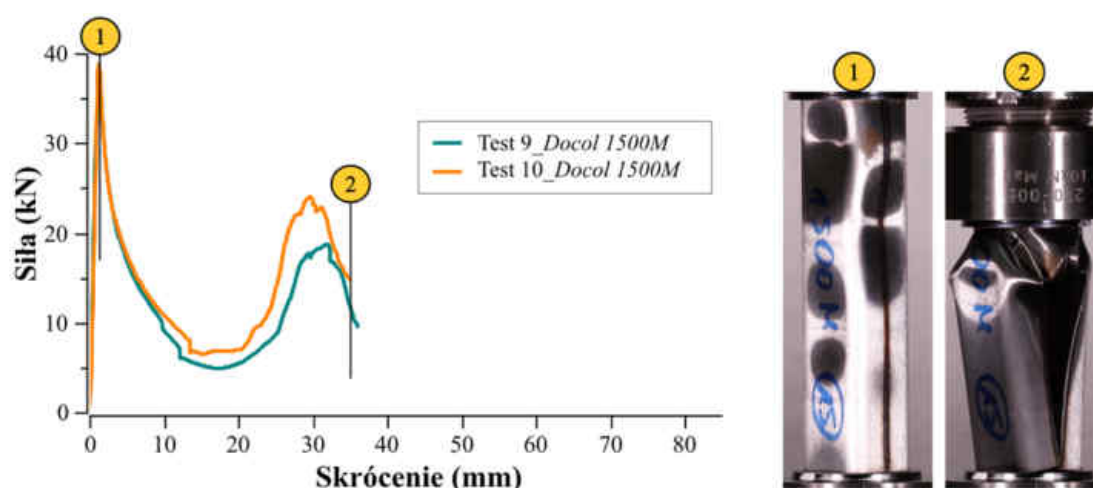
Rys. 113. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 800DP w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3)



Rys. 114. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 1000DP w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3)

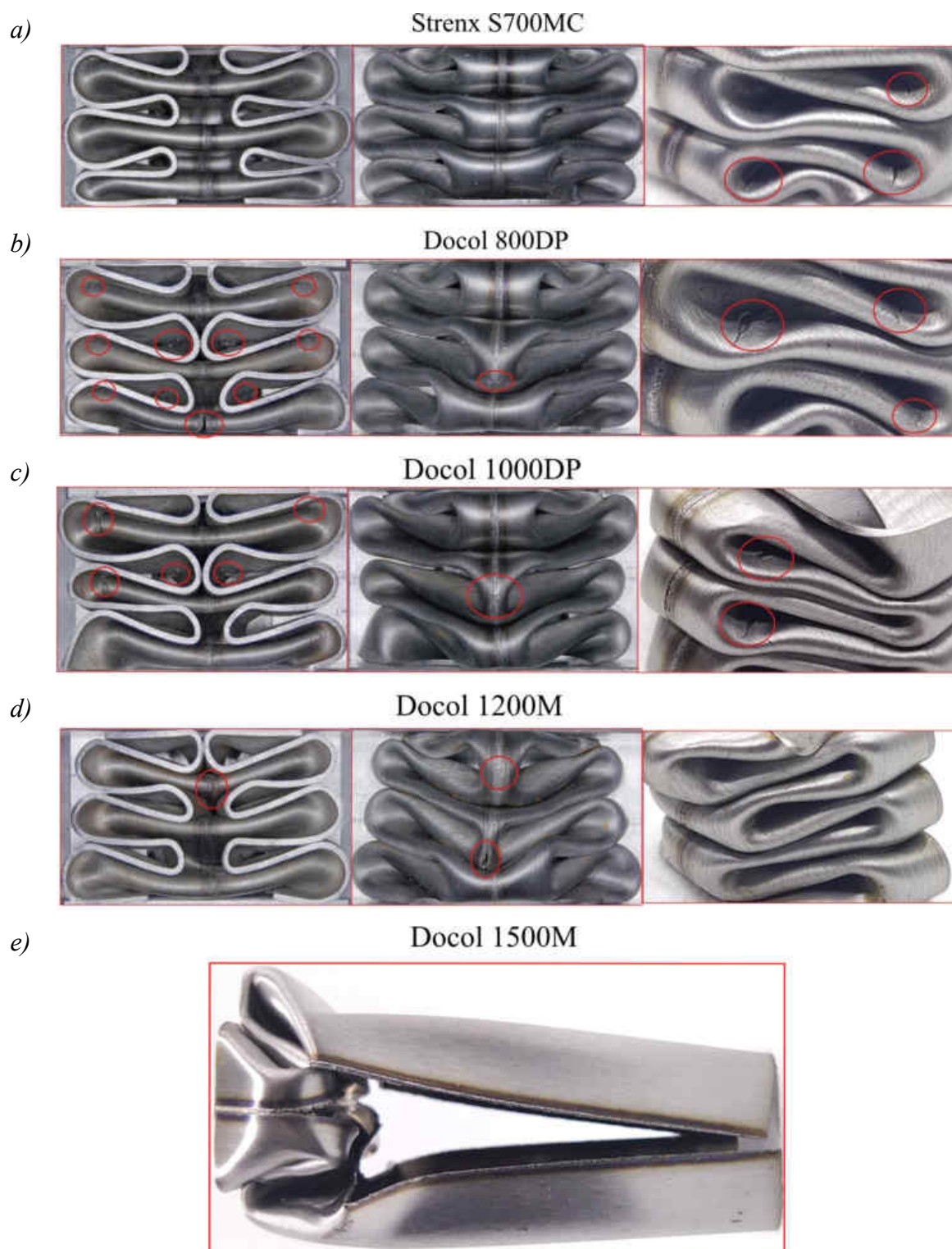


Rys. 115. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 1200M w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3)



Rys. 116. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 1500M w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1) oraz skrócenia o wartości 35 mm (2)

Po testach zgniatania w warunkach obciążenia quasi-statycznego, absorbery zostały przecięte wzdłuż ich osi głównej w celu obserwacji występujących uszkodzeń. Pęknięcia zaobserwowano we wszystkich badanych absorberach, głównie w narożach absorbera. W zależności od zastosowanego materiału, pęknięcia różniły się od siebie kształtem. W przypadku stali Strenx S700MC (rys. 117a), Docol 800DP (rys. 117b) i Docol 1000DP (rys. 117c) były to krótkie pęknięcia zlokalizowane głównie na wewnętrznych stronach fałd, prostopadłe do kierunku szlifowania blachy (kierunku walcowania blachy). Ponadto, w przypadku stali Docol 800DP zaobserwowano niewielkie poprzeczne pęknięcia spoiny oraz pęknięcia wzdłużne w SWC w dolnej części absorbera. W absorberze wykonanym ze stali Docol 1200M (rys. 117d) stwierdzono pęknięcia poprzeczne spoiny oraz wzdłużne w SWC w środkowej fałdzie absorbera. Nie zaobserwowano jednak tak dużej liczby pęknięć na wewnętrznych stronach fałd, jak w przypadku wcześniej omawianych absorberach. Spośród wszystkich testowanych absorberów szczególnie wyróżniały się te wykonane ze stali Docol 1500M, gdyż zniszczenie połączenia spawanego następowało na prawie całej jego długości już przy skróceniu o 35 mm, zarówno w SWC, jak i bezpośrednio w spoinie (rys. 117e).



Rys. 117. Widoki absorberów po testach wykonanych w warunkach obciążenia quasi-statycznego z zaznaczonymi miejscami lokalizacji pęknięć dla materiałów: a) Strenx S700MC, b) Docol 800DP, c) Docol 1000DP, d) Docol 1200M, e) Docol 1500M

Wybrane parametry charakteryzujące energochłonność miniaturowych absorberów energii przedstawiono w tab. 8. Wartości zaabsorbowanej energii rosły wraz ze wzrostem wytrzymałości materiału, wyjątkiem są absorbery wykonane ze stali Docol 1500M, które już od momentu wystąpienia siły zniszczenia ulegały uszkodzeniom w złączu spawanym oraz w narożach fałd. Najwyższe wartości wskaźnika CFE stwierdzono dla absorberów wykonanych ze stali Docol 800DP i Docol 1000DP, najniższe zaś dla stali martenzytycznych, co jest bezpośrednio związane z wystąpieniem wyższej wartości siły zniszczenia. Ze względu na uszkodzenie złącza spawanego w absorberach wykonanych ze stali Docol 1500M nie wyznaczono parametru CFE.

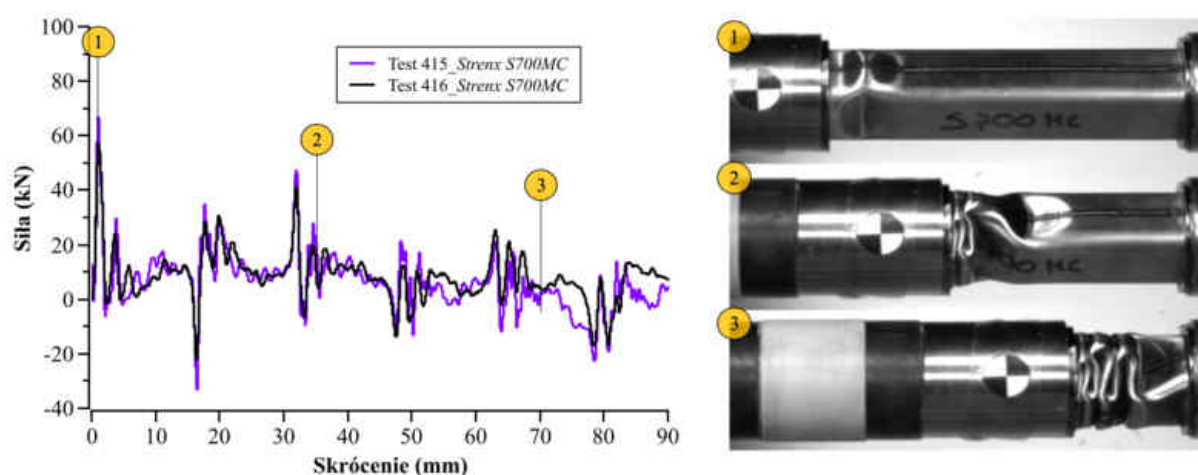
Tab. 8 Wybrane parametry charakteryzujące energochłonność miniaturowych absorberów energii w warunkach obciążeń quasi-statycznych

Parametry energochłonności mechanicznej					
	Energia pochłaniania dla skrócenia 70 mm [J]	Siła zniszczenia [kN]	Średnia siła zniszczenia [kN]	CFE [-]	E _w [J/g]
S700MC_test1	784,2	26,4	10,7	0,40	20,9
S700MC_test2	728,9	23,7	9,6	0,40	19,4
800DP_test3	787,1	25,4	10,6	0,42	21,0
800DP_test4	798,1	26,6	10,8	0,41	21,3
1000DP_test5	823,5	26,9	10,8	0,40	22,0
1000DP_test6	811,3	26,7	10,9	0,41	21,6
1200M_test7	971,9	34,2	12,9	0,38	25,9
1200M_test8	1000,7	34,6	13,0	0,37	26,7
1500M_test9	430,3	38,1	-	-	-
1500M_test10	481,8	38,9	-	-	-

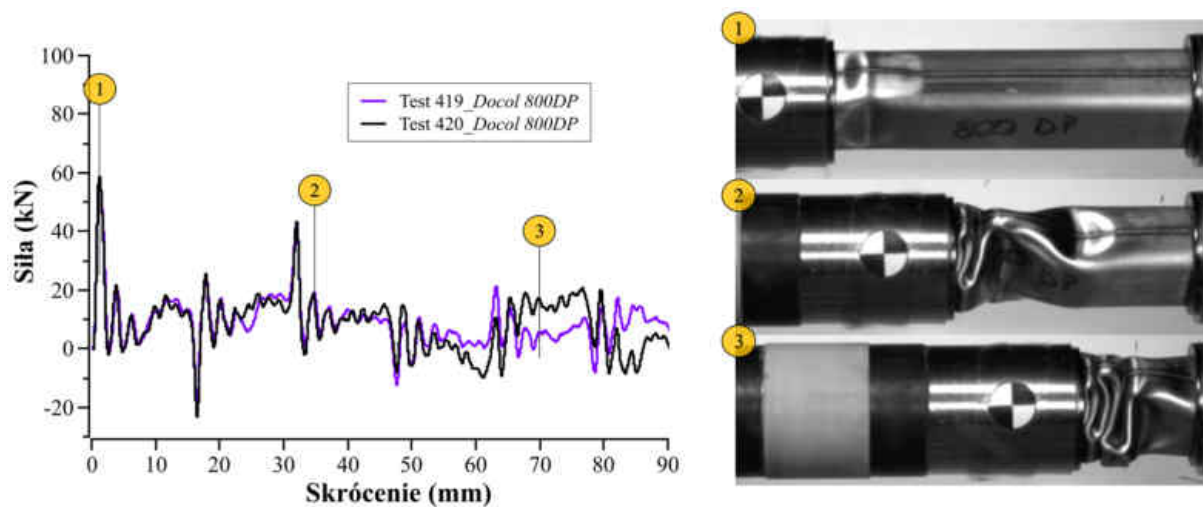
6.3. TESTY ZGNIATANIA ABSORBERÓW ENERGII MECHANICZNEJ W WARUNKACH OBCIĄŻENIA DYNAMICZNEGO

Proces kształtowania się fałd podczas zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia dynamicznego jest podobny do procesu

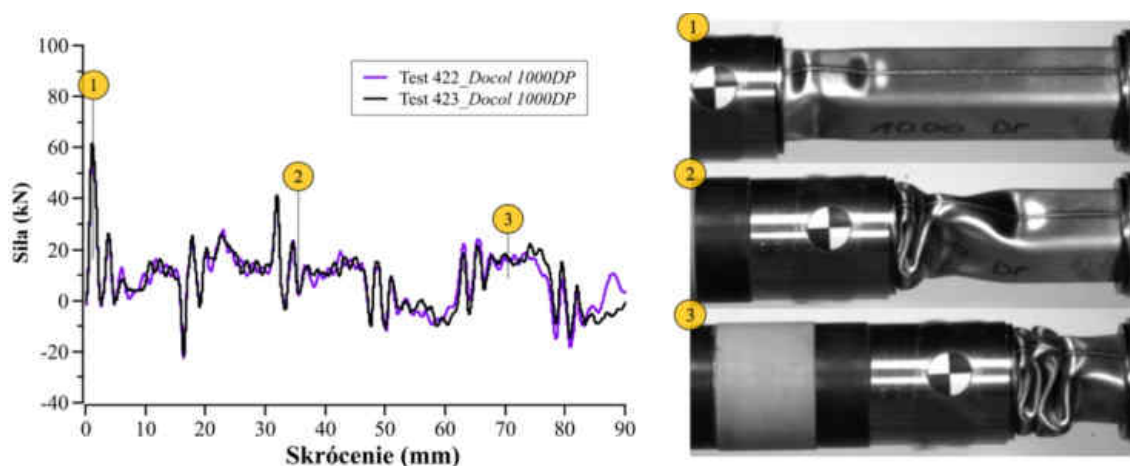
przeprowadzonego w warunkach quasi-statycznych. Zdjęcia ilustrujące kolejne etapy kształtowania się fałd absorbera przedstawiono odpowiednio dla stali: Strenx S700MC (rys. 118), Docol 800DP (rys. 119), Docol 1000DP (rys. 120), Docol 1200M (rys. 121), Docol 1500M (rys. 122). Główną różnicą pomiędzy procesem zgniatania absorbera w warunkach quasi-statycznym i dynamicznym jest rozmiar obszarów deformacji na etapie wystąpienia siły zniszczenia. Przekłada się to bezpośrednio na różnice w odległościach pomiędzy kolejnymi fałdami. Przykładowo, w przeciwieństwie do zgniatania absorberów wykonanych ze stali Docol 1500M (rys. 123) w warunkach quasi-statycznych, dynamiczne obciążenie wywołane uderzeniem pręta wymuszającego w podkładkę zamocowaną na czole absorbera powodowało uszkodzenie obu połączeń klejonych zaraz po osiągnięciu siły zniszczenia. Oprócz początkowego wzrostu siły, obserwowano także kolejne, o mniejszej amplitudzie skoki siły odpowiadające kształtowaniu się kolejnych par fałd. Na przedstawionych wykresach siła-skrócenie obserwowano również ujemne skoki siły, które wynikają z odbicia fali od czoła pręta odbiorczego i jej powrotu w postaci fali rozciągającej (odciążającej). Opisane zjawisko jest główną wadą zaproponowanej metody oceny energochłonności wykorzystującej technikę SHPB do bezpośredniego uderzenia w absorber.



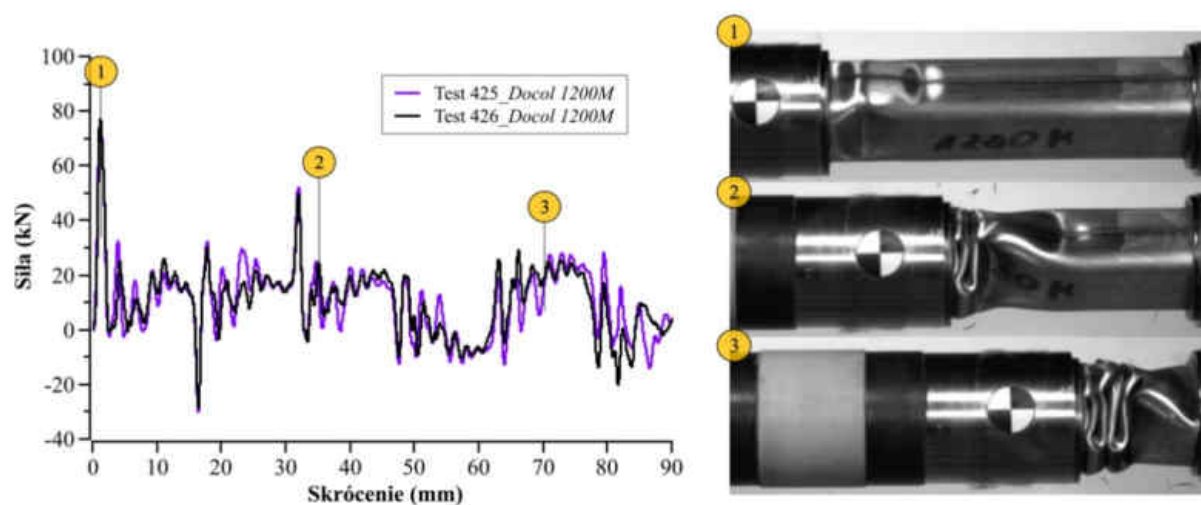
Rys. 118. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Strenx S700MC prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3)



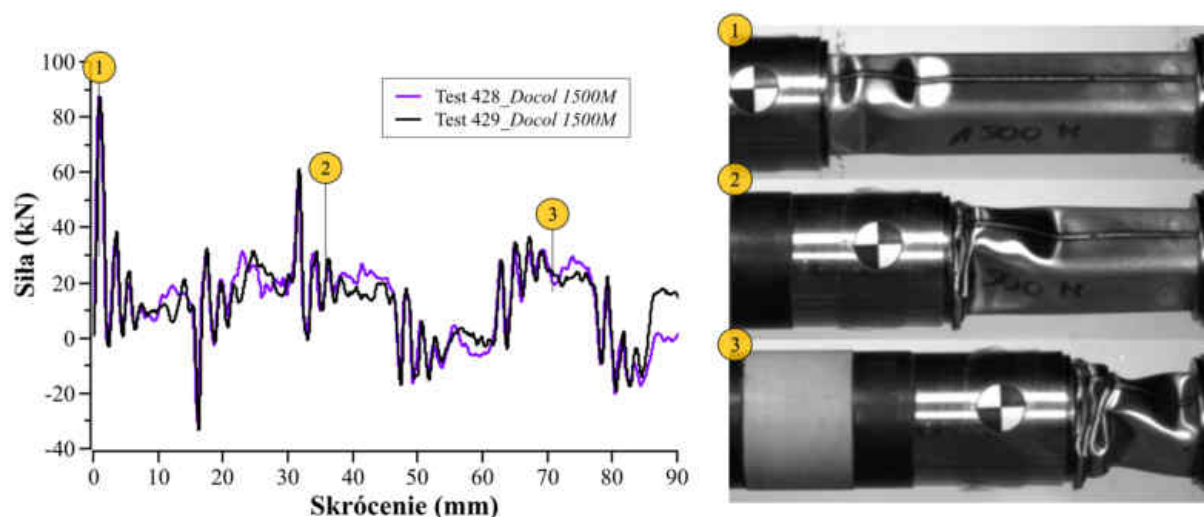
Rys. 119. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 800DP prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3)



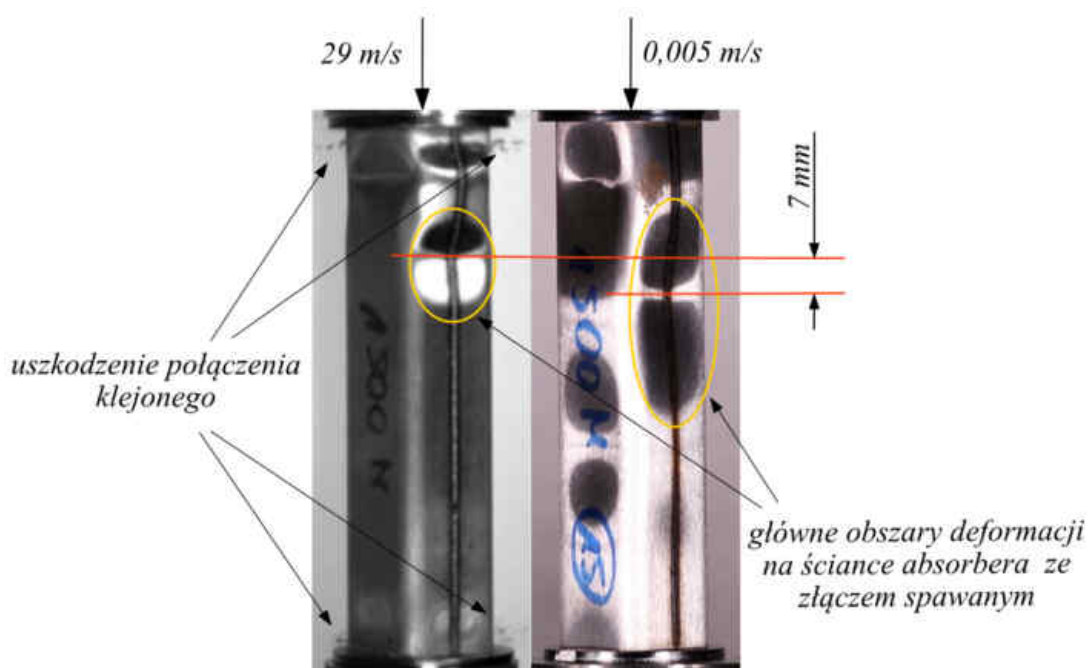
Rys. 120. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 1000DP prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3)



Rys. 121. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 1200M prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3)

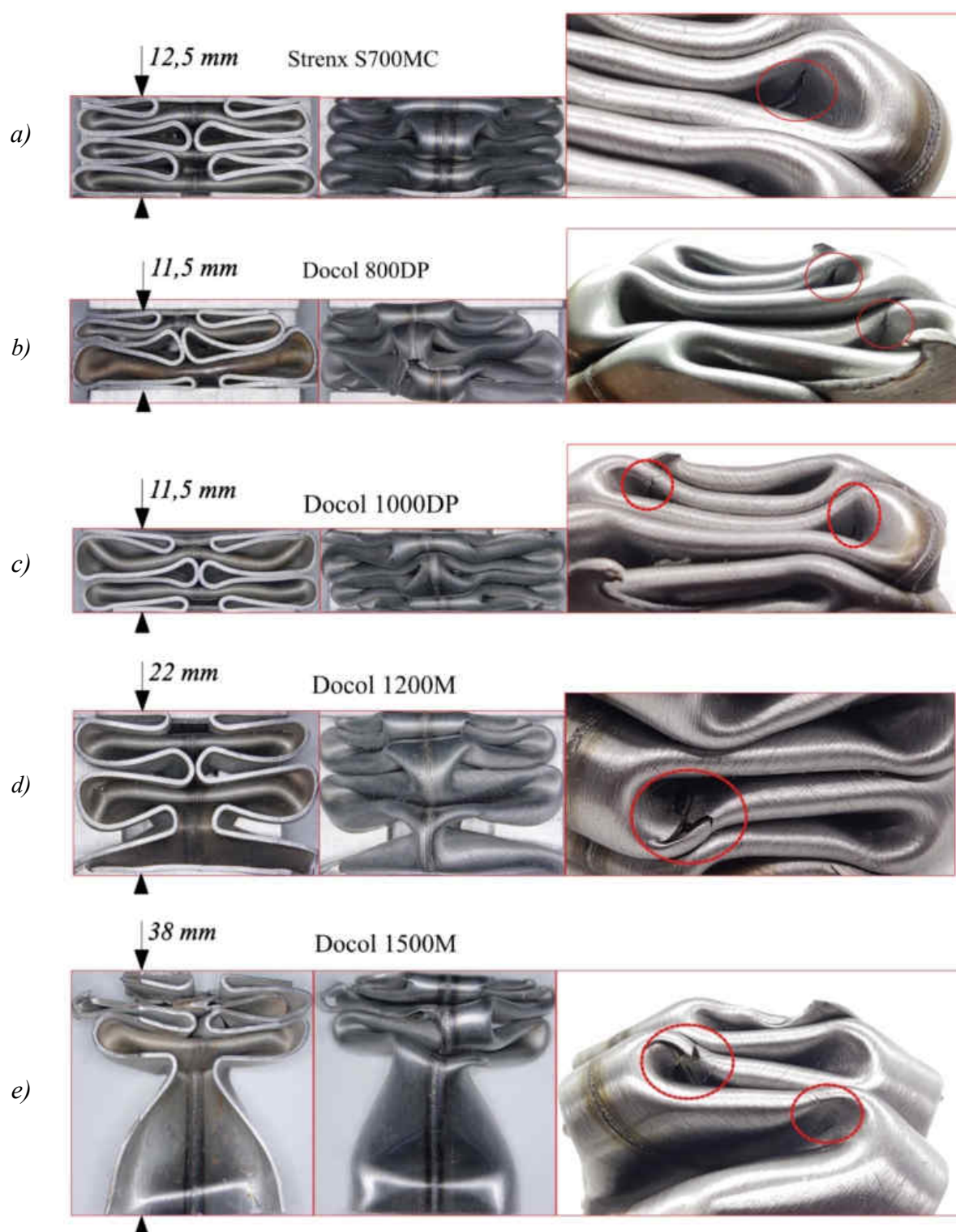


Rys. 122. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 1500M prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3)



Rys. 123. Porównanie zdjęć absorberów wykonanych ze stali Docol 1500M zarejestrowanych w chwili osiągnięcia siły zniszczenia podczas testu dynamicznego (po lewej) oraz quasi-statycznego (po prawej)

Widoki przekrojów wzdłużnych przeciętych absorberów wraz z wyraźnie widocznymi pęknięciami przedstawiono na rys. 124. Obydwa gatunki stali DP (rys. 124b, c) cechowały się najniższą wysokością absorberów po teście dynamicznego zgniatania, średnio 11,5 mm. Nieco wyższą wysokość miały absorbery wykonane ze stali Strenx S700MC, a w przypadku stali Docol 1200M i Docol 1500M wysokość zdeformowanych absorberów wyniosła odpowiednio 22 i 38 mm. W przypadku stali Strenx S700MC, Docol 800DP i Docol 1000DP stwierdzono powstanie głównie pęknięć krótkich, prostopadle zorientowanych na wewnętrznych ścianach fałd. W absorberach ze stali Docol 800DP natomiast zaobserwowano również rozerwanie połączenia spawanego podczas kształtowania się drugiej pary fałd. Dla absorberów wykonanych ze stali martenzytycznych obserwowane pęknięcia miały bardziej złożony kształt w porównaniu do pozostałych materiałów, tj. były nieregularne, równoległe i prostopadłe do kierunku szlifowania materiału.



Rys. 124. Widoki absorberów po testach zgniatania w warunkach obciążenia dynamicznego z zaznaczonymi miejscami pęknięć dla badanych materiałów: a) Strenx S700MC, b) Docol 800DP, c) Docol 1000DP, d) Docol 1200M, e) Docol 1500M

Podobnie jak w przypadku obciążeń quasi-statycznych, parametry określające energochłonność miniaturowych absorberów energii zestawiono w tab. 9. Widoczne jest podobieństwo pomiędzy wynikami testów w warunkach obciążeń quasi-statycznych i dynamicznych, wyrażające się wyraźną zależnością pomiędzy wytrzymałością materiału absorbera, a jego zdolnością do pochłaniania energii mechanicznej, tj. wraz ze wzrostem wytrzymałości materiału zwiększała się średnia energia pochłaniania danego absorbera. W stosunku do absorberów badanych w warunkach quasi-statycznych, energochłonność mechaniczna absorberów w warunkach dynamicznych była wyższa średnio o 19% dla stali Docol 1000DP oraz o 17% dla stali martenzytycznych. Wyższe wartości świadczą o dodatniej wrażliwości stali DP na szybkość odkształcenia. Najwyższe wartości parametru CFE uzyskano dla absorberów wykonanych ze stali Docol 800DP (0,22) i Docol 1000DP (0,23), najmniejsze zaś dla absorberów wykonanych ze stali martenzytycznych (0,21). Pomimo, iż absorbery wykonane ze stali martenzytycznej zaabsorbowały największe ilości energii uderzenia, to Docol 1200M i Docol 1500M nie są materiałami powszechnie stosowanymi do produkcji kolumnowych absorberów energii. Jednym z powodów są problemy technologiczne związane z niską ciągliwością tych stali. Dlatego wiele elementów wykonanych ze stali martenzytycznych np. wzmocnienie zderzaka lub belki wzmacniające drzwi produkowane są głównie w technologii profilowania za pomocą walcarek. Również w pojazdach elektrycznych obserwuje się wzrost wykorzystania stali martenzytycznych celem osłony pakietów bateryjnych przed zniszczeniem podczas kolizji. W tym przypadku do wykonywania osłon jest wykorzystywana wtedy m.in. technologia tłoczenia, a następnie (ze względu na wysoką wytrzymałość) wycinanie laserowe. Stal Strenx S700MC wykorzystywana jest natomiast do budowy kolumnowych absorberów energii mechanicznej, jednak są to głównie aplikacje wykorzystujące blachy o grubości powyżej 2 mm, np. w branży kolejowej. Jednym z głównych powodów ograniczonej stosowalności stali Strenx S700MC w produkcji wielkoseryjnej są trudności związane z obróbką powierzchniową wynikające z technologii produkcji blachy (walcowanie termomechaniczne).

Tab. 9. Wybrane parametry charakteryzujące energochłonność miniaturowych absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia dynamicznego

Parametry energochłonności mechanicznej					
	Energia pochłaniania dla 70 mm skrócenia [J]	Siła zniszczenia [kN]	Średnia siła zniszczenia [kN]	CFE [-]	E_w [J/g]
S700MC_test415	858,1	67,0	13,7	0,20	22,9
S700MC_test416	834,2	57,1	11,8	0,21	22,2
800DP_test419	905,5	57,8	13,4	0,23	24,1
800DP_test420	847,2	58,9	13,2	0,22	22,6
1000DP_test422	938,9	58,5	13,6	0,23	25,0
1000DP_test423	958,4	62,1	14,0	0,23	25,6
1200M_test425	1158,5	75,9	16,1	0,21	30,9
1200M_test426	1157,0	77,2	16,5	0,21	30,8
1500M_test428	1238,0	87,2	17,2	0,20	33,0
1500M_test429	1215,7	87,4	18,2	0,21	32,4

6.4. PODSUMOWANIE

W rozdziale przedstawiono wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych z użyciem technologii spawania laserowego i różnych gatunków blach. Zgniatanie absorberów w warunkach obciążeń quasi-statycznych przeprowadzono za pomocą standardowej maszyny wytrzymałościowej, zaś testy dynamiczne absorberów wykonano za pomocą zmodyfikowanego układu techniki dzielonego pręta Hopkinsona nazywaną również metodą bezpośredniego uderzenia próbki.

W obydwu przypadkach zastosowanego obciążenia, materiałami absorberów korzystnie wyróżniającymi się w zakresie efektywności pochłaniania energii mechanicznej są stale Docol 800DP i Docol 1000DP, pomiędzy którymi nie stwierdzono dużych różnic, zwłaszcza w przypadku testów w warunkach obciążeń dynamicznych. Interesujące jest zachowanie się absorberów wykonanych ze stali Docol 1500M dla obydwóch warunków obciążenia. Prawie całkowite uszkodzenie połączenia spawanego w warunkach bardzo małych prędkości odkształcenia 0,005 m/s w porównaniu do krótkich, wzdłużnych pęknięć, powstałych podczas

uderzenia z prędkością 29 m/s może być zaskakujące. Jednakże wzięwszy pod uwagę efekty inercyjne towarzyszące propagacji fali ściskającej podczas dynamicznego zgniatania absorbera, powyższe zachowanie absorberów można wyjaśnić wpływem sił bezwładności na tworzenie i niszczenie kolejnych par fałd. W warunkach dynamicznego ściskania obserwuje się mianowicie, skrócenie odległości pomiędzy miejscami, gdzie tworzy się kolejna para fałd oraz opóźnienie procesu zniszczenia połączenia spawanego i materiału absorbera.

Podczas wszystkich testów absorberów obserwowano również uszkodzenia połączeń spawanych od stron przyklejonych podkładek ochronnych. Wpływ na te uszkodzenia mogło mieć niewystarczająco silne połączenie absorbera z podkładkami. Zastosowanie trwałego połączenia pomiędzy czołem absorbera i podkładką umożliwiłoby zwiększenie stabilności zgniatania absorbera podczas tworzenia się kolejnych par fałd, zwłaszcza podczas testu dynamicznego. Wydaje się, że trwałe połączenie podkładek z korpusem absorbera mogłoby być uzyskane w wyniku wykonania doczołowego laserowego połączenia spawanego od strony podkładek lub połączenia kształtowego pomiędzy podkładkami a absorberem.

Dodatkowym czynnikiem mogącym mieć wpływ na zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia pęknięć mogłoby być zastosowanie obustronnego szlifowania blach absorberów, które mogłoby wywołać pewne zmiany strukturalne w materiale absorbera. Jednakże, ze względu na fakt, że w procesie obróbki blach zostały zachowane takie same warunki produkcyjne, a przeprowadzone testy miały charakter badań porównawczy, wpływ obróbki szlifowania powierzchni absorberów na ocenę energochłonności rozpatrywanych absorberów uznano za nieistotny. Podstawową korzyścią wynikającą ze szlifowania blach była możliwość bardziej szczegółowej obserwacji przebiegu procesu kształtowania się kolejnych fałd podczas testu quasi-statycznego, jak również podczas bezpośredniego uderzenia absorbera. Pozwoliło to na lepsze zrozumienie różnic w przebiegu deformacji i niszczenia połączeń spawanych w zależności od rodzaju materiału absorbera, jak i warunków obciążenia.

- strona celowo pozostawiona pusta -

WNIOSKI KOŃCOWE

Wykorzystanie stali jako jednego z głównych materiałów do budowy struktur energochłonnych jest jednym z wiodących obecnie kierunków rozwoju bezpieczeństwa biernego pojazdów. Potencjał stosowania stali jest jednak zależny głównie od dążności do redukcji masy konstrukcji pojazdów. W związku z tym, wykorzystanie cienkich blach o wytrzymałości znacznie przekraczającej konwencjonalne gatunki stali w połączeniu ze specyficznymi dynamicznymi właściwościami mechanicznymi stali AHSS, a także zastosowanie technologii spawania laserowego do łączenia elementów nadwozi pojazdów jest odpowiedzią na obecne wymagania rynku. Wymagania te są głównie związane z obniżaniem masy struktur pojazdów z jednoczesnym zwiększaniem poziomu bezpieczeństwa, ograniczeniem śladu węglowego, jak również z obniżaniem kosztów produkcji. W związku z powyższym istotne jest prowadzenie badań związanych z oceną reakcji mechanicznej stalowych konstrukcji spawanych laserowo w warunkach obciążeń dynamicznych. Dlatego **celem naukowym rozprawy było poszukiwanie korelacji pomiędzy jakością procesu spawania laserowego cienkich blach ze stali o podwyższonej wytrzymałości, a reakcją mechaniczną połączenia spawanego.** Cel został osiągnięty poprzez realizację ponad 580 testów doświadczalnych pięciu gatunków stali spawanych laserowo, które poddano badaniom nie tylko z zastosowaniem standardowych metod oceny złączy spawanych, ale także za pomocą metody dzielonego pręta Hopkinsona na rozciąganie.

W **pierwszej części** pracy zaprezentowano wyniki badań właściwości mechanicznych złączy doczołowych wykonanych z pięciu gatunków stali o zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych, obecnie stosowanych w branży motoryzacyjnej i kolejowej. Badania właściwości mechanicznych w warunkach jednoosiowego rozciągania zrealizowano dla trzech poziomów szybkości odkształcenia, tj.: niskiego - 10^{-3} s^{-1} , średniego - 10^0 s^{-1} i wysokiego - 10^3 s^{-1} . Na podstawie otrzymanych wyników określono wpływ szybkości odkształcenia na wartość naprężenia maksymalnego, ciągliwość, energię deformacji (energochłonność) oraz wrażliwość na szybkość odkształcenia. Oprócz standardowej quasi-statycznej próby rozciągania przeprowadzono testy w zakresie dużych szybkości odkształcenia wykorzystujące technikę dzielonego pręta Hopkinsona na rozciąganie stosując autorskie rozwiązanie układu mocowania próbki. Ocena wrażliwości na szybkość odkształcenia próbek ze złączami

spawanymi nie jest standardowym podejściem stosowanym w badaniu złącz spawanych ze względu na niejednorodność struktury materiału w złączu. Jednakże, w pracy podjęto próbę oceny wrażliwości złącz spawanych w odniesieniu do materiału niespawanego, a uzyskane wyniki mogą być wykorzystane np. do symulacji procesu tłoczenia blach spawanych laserowo. Część wyników badań została wykorzystana podczas wdrażania nowych produktów w miejscu pracy doktoranta, firmie Bozamet. Podsumowując, uzyskane wyniki badań pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Złącza spawane wykonane za pomocą lasera włóknowego cechują się niejednorodną strukturą o zróżnicowanych właściwościach materiałowych, a złącza spawane wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,6 mm wykazały wyraźne zmniejszenie twardości w strefie przetopienia w stosunku do złączy wykonanych wiązką o średnicy 0,3 mm. Zmiany zarówno w twardości materiału, jak również w jego mikrostrukturze widoczne były głównie dla stali zimnowalcowanych. Największe zmiany związane z twardością i szerokością strefy przetopienia oraz SWC wykazały próbki wygrzewane dodatkowo po spawaniu. Stale Docol 800DP, Docol 1000DP, Docol 1200M oraz Docol 1500M po spawaniu laserowym wykazały znaczne zmniejszenie twardości materiału w strefie odpuszczenia SWC.
- Możliwe jest wykorzystanie klasycznej aparatury dzielonego pręta Hopkinsona na ściskanie do badania w warunkach jednoosiowego testu rozciągania. Dzięki wykorzystaniu opisaney w pracy konstrukcji uchwytów mocujących próbkę materiałową oraz zaproponowanej geometrii próbki możliwe było przeprowadzenie testów dynamicznych spełniających wymagania metodyczne techniki Hopkinsona. Należy jednak podkreślić, że dokładność i powtarzalność wykonania próbek ma kluczowe znaczenie dla otrzymania wiarygodnych wyników badań metodą SHPB.
- Uzyskane krzywe rozciągania wyraźnie pokazują różnice między zachowaniem mechanicznym złącz spawanych podczas obciążeń quasi-statycznych i dynamicznych. Naprężenie plastycznego płynięcia dla materiału niespawanego wzrasta wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia dla wszystkich badanych gatunków stali. Dla próbek materiału

niespawanego i spawanego, najwyższe wartości poziomy naprężenia uzyskano dla szybkości odkształcenia 10^3 s^{-1} .

- Niespawane stale Strenx S700MC, Docol 1200M i Docol 1500M wykazały podobny charakter zmian wydłużenia całkowitego w funkcji szybkości odkształcenia. Odmienne charakter wykazała stal Docol 800DP i Docol 1000DP, które dla średniego poziomu szybkości odkształcenia wykazywały spadek całkowitego wydłużenia zrywającego. Próbki ze złączami spawanymi charakteryzowały się niższą ciągliwością niż próbki niespawane niezależnie od gatunku badanych stali. Z kolei, wydłużenie całkowite próbek spawanych jest największe w warunkach odkształcenia zachodzącego z szybkością 10^3 s^{-1} .
- Wartość współczynnika wrażliwości na szybkość odkształcenia - $m_{0,02}$ zależy od rodzaju badanych stali, tj. wraz ze wzrostem wytrzymałości badanego gatunku stali zmniejsza się wrażliwość na szybkość odkształcenia. W zakresie szybkości odkształcenia od 10^{-3} s^{-1} do 10^0 s^{-1} stale Docol 800DP i Docol 1000DP cechują się wyższą wrażliwością niż pozostałe badane gatunki stali. W drugim badanym zakresie szybkości odkształcenia ($10^0 \leq \dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ s}^{-1}$), najwyższe wartości współczynnika $m_{0,02}$ stwierdzono dla stali Strenx S700MC, co przypisuje się występowaniu struktury ferrytycznej, która jest wrażliwa na szybkość odkształcenia.
- Dodatkowa obróbka cieplna w postaci nagrzewania laserowego przed spawaniem spowodowała zmniejszenie wytrzymałości wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia dla obu badanych gatunków stali martenzytycznych (Docol 1200M i Docol 1500M), których próbki wycięto prostopadle do kierunku walcowania blachy.
- Względna energia deformacji złącz spawanych przy 5% wydłużeniu jest na podobnym poziomie wartości dla stali Strenx S700MC, Docol 800DP i Docol 1000DP, a jej wartość wyniosła ok 40 J/mm^3 . Dla gatunków stali martenzytycznych zauważono spadek - średnio o około 15% - wartości energii deformacji próbek ze złączami spawanymi w stosunku do próbek niespawanych. Wartość energii nieznacznie wzrastała wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia.

W **drugiej części** rozprawy przeprowadzono badania miniaturowych absorberów energii w warunkach obciążenia quasi-statycznego i dynamicznego. Motywacją do przeprowadzenia tego typu badań były oryginalne wyniki badań dynamicznych na rozciąganie próbek materiałowych ze złączami spawanymi laserowo. Pomysł ten zrodził się także z pewnej „ciekawości” naukowej związanej z badaniem zachowania się nie tylko połączeń spawanych wykonanych w próbkach materiałowych, ale również konstrukcji spawanej laserowo poddanej obciążeniom dynamicznym. Przeprowadzone badania pozwoliły na porównanie zachowania się miniaturowej konstrukcji absorbera energii mechanicznej o przekroju kwadratowym podczas zgniatania w warunkach obciążenia quasi-statycznego i dynamicznego. Istotną wartością poznawczą tej części pracy jest ukazanie wpływu efektów bezwładnościowych występujących podczas testu dynamicznego na przebieg procesu deformacji i niszczenia absorbera, w szczególności wykonanego ze stali Docol 1500M.

Na rynku pojawia się coraz więcej nowych gatunków stali AHSS, a jakość oferowanych materiałów różni się w zależności od producenta stali. W związku z tym skrócenie czasu i kosztów weryfikacji jakości danego materiału oraz wyboru sposobu jego łączenia pod kątem energochłonności jest niezwykle pożądane. Dlatego na podstawie wyników badań otrzymanych w ramach niniejszej rozprawy proponuje się wykorzystanie metodyki bezpośredniego uderzenia w modelowy, miniaturowy absorber energii mechanicznej w celu dokonania wstępnej oceny jakości połączenia spawanego. Proponowana metodyka mogłaby być interesującym uzupełnieniem metody opisanej w pracy [123], w której autorzy skupiają się na ocenie przydatności do zastosowania materiału na absorber energii mechanicznej na podstawie testów z użyciem próbki miniaturowej. Dodatkowo, chciałbym zwrócić uwagę, że ww. metodyka badań pozwala jedynie na wstępną ocenę możliwości wykorzystania danego materiału i metody łączenia, i nie można wyłącznie na jej podstawie oceniać charakteru deformacji absorbera w skali rzeczywistej. Najważniejsze wnioski z drugiej części rozprawy są następujące:

- Energochłonność mechaniczna absorberów w warunkach dynamicznych była wyższa średnio o 19% dla stali Docol 1000DP oraz o 17% dla stali martenzytycznych w stosunku do energochłonności określonej w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Najwyższe wartości energii deformacji odpowiadające skróceniu absorbera o wartość 70 mm

w warunkach dynamicznych wykazały absorbery ze stali martenzytycznych Docol 1200M i Docol 1500M. W przypadku absorberów ze stali DP otrzymana wartość energii deformacji była niższa o ok 23%.

- Absorbery wykonane ze stali DP (Docol 800DP i Docol 1000DP) wykazały wyższe wartości współczynnika CFE w porównaniu do konstrukcji wykonanych z pozostałych badanych gatunków stali. Wraz ze wzrostem wartości CFE, zwiększa się stabilność procesu zgniatania, dlatego stal DP jest materiałem często wykorzystywanym do budowy kolumnowych absorberów energii.
- Podczas testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej w warunkach obciążenia dynamicznego obserwowano mniejsze odległości pomiędzy tworzącymi się kolejnymi fałdami deformacji w stosunku do wyników uzyskanych w podczas testów w warunkach quasi-statycznych. Absorbery wykonane ze stali Docol 1500M ulegały zniszczeniu już we wczesnym etapie deformacji, podczas gdy w warunkach testów dynamicznych charakteryzowały się one wyższą odpornością na zniszczenie i najwyższymi wartościami energii absorpcji. Wspomniana cecha absorberów ze stali Docol 1500M wynika prawdopodobnie z występowania sił inercyjnych oraz efektów falowych w trakcie obciążenia dynamicznego, które to efekty opóźniają początek zarodkowania pęknięć wzdłuż połączeń spawanych.

Podsumowując, **osiągnięto założony w rozprawie doktorskiej cel oraz udowodniono tezę naukową pracy, poprzez:**

- Opracowanie i wdrożenie metodyki badań właściwości mechanicznych złącz spawanych laserowo w warunkach testu Hopkinsona na rozciąganie;
- Potwierdzenie odmiennej reakcji mechanicznej złącz spawanych w warunkach dynamicznych i quasi-statycznych;
- Określenie wpływu czynników technologicznych procesu spawania laserowego na reakcję mechaniczną złącz spawanych rozciąganych z różnymi szybkościami odkształcenia, tj. 10^{-3} s^{-1} , 10^0 s^{-1} oraz 10^3 s^{-1} ;

- Wykazanie różnic w zachowaniu się konstrukcji spawanych laserowo w postaci miniaturowych, kolumnowych absorberów energii mechanicznej, poddanych obciążeniom quasi-statycznym i dynamicznym.

Przedstawiony w rozprawie zakres prac i otrzymane wyniki nie wyczerpują w pełni problematyki mechanicznego zachowania się połączeń spawanych laserowo w warunkach obciążeń dynamicznych. Dlatego uważam, że **dalsze badania powinny być ukierunkowane na następujące zagadnienia:**

- badania dynamiczne na rozciąganie w różnych warunkach temperaturowych, na przykład zakresie temperaturowym od -40°C do 100°C – jest to typowy zakres temperaturowy stosowany podczas badań dynamicznych materiałów wykorzystywanych do budowy struktur pojazdów drogowych;
- wykorzystanie laserów wielomodowych (np. laserów typu AMB) oraz głowic procesowych umożliwiających modyfikację geometrii plamki procesowej do łączenia blach;
- zastosowanie zmodyfikowanej techniki SHPB bezpośredniego uderzenia w próbkę do badania zachowania konstrukcji wykonanej z blach pod wpływem dynamicznych obciążeń zginających, np. badanie miniaturowej belki przedniej samochodu lub słupka bocznego.
- oceny wpływu zmęczenia mechanicznego materiału absorbera na jego zdolność do pochłaniania energii uderzenia.

SPIS ILUSTRACJI

Rys. 1. Gatunki materiałów wykorzystywanych w projekcie FSV [9]	15
Rys. 2. Główne technologie produkcyjne wykorzystywane w projekcie FSV [9]	15
Rys. 3. Porównanie różnych gatunków stali stosowanych w motoryzacji z uwzględnieniem ich właściwości mechanicznych w postaci wydłużenia i wytrzymałości na rozciąganie [10].....	18
Rys. 4. Schemat poglądowy ilustrujący wykorzystanie różnych gatunków stali wysokowytrzymałych w konstrukcji pojazdu osobowego [22]	20
Rys. 5. Widok oprzyrządowania i wytłoczki do hartowania w procesie tłoczenia stali typu HF [19]..	21
Rys. 6. Przykłady wykorzystania stali AHSS w konstrukcjach poszyć pakietów bateryjnych: a) w samochodzie Tesla Y [23]; b) w pojeździe ciężarowym (fot. Paweł Prochenka, Targi Pojazdów Użytkowych IAA, Hannover 2022 r.) oraz c) w lokomotywie o napędzie elektrycznym (fot. Paweł Prochenka, Targi Pojazdów Szynowych, INNOTRANS, Berlin 2022 r.).....	23
Rys. 7. Zmiany wartości współczynnika umocnienia odkształceniowego n w funkcji wielkości odkształcenia dla stali HSLA 350, DP 600 i TRIP 600 [10]	26
Rys. 8. Odzworowanie graficzne wpływu wartości gęstości energii dla typowych źródeł spawalniczych w stosunku do geometrii wtopienia [63]	32
Rys. 9. Regulowany profil wiązki stosowanej w laserach włóknowych typu AMB [66]	34
Rys. 10. Widok 6-osiowego robota przemysłowego z zainstalowaną głowicą spawalniczą z widocznymi dyszami doprowadzającymi gaz osłonowy w miejsce połączenia spawanego (fot. Paweł Prochenka, Ditzingen (Niemcy), siedziba firmy TRUMPF, 2015 r.).....	38
Rys. 11. Zastosowanie TWB w budowie struktury pojazdu drogowego [80].....	39
Rys. 12. Widok systemu spawania laserowego z wykorzystaniem głowicy skanującej [84]	40
Rys. 13. Cienkościenna konstrukcja spawana laserowo, wykorzystywana w pojazdach szynowych (fot. Paweł Prochenka, Targi Pojazdów Szynowych INNOTRANS, Berlin 2016 r.)	41
Rys. 14. Widok doczołowego złącza spawanego laserem z zaznaczonym miejscem braku przetopienia [87].....	44
Rys. 15. Schematy przykładów rozwiązań konstrukcyjnych układów badawczych do badań dynamicznych na rozciąganie [88,94]	49
Rys. 16. Porównanie przebiegów dynamicznych uzyskanych dla materiału próbek mocowanych dla trzech typów uchwytów [99]	51
Rys. 17. Widok absorberów energii mechanicznej stosowanych w pojeździe szynowym po zderzeniu z przeszkodą (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2017 r.)	52

Rys. 18. Przykładowa charakterystyka zgniatania cienkościennego absorbera energii mechanicznej a) oraz widok częściowo odkształconego cylindrycznego absorbera energii b) [100].....	52
Rys. 19. Globalne wyboczenie absorberów bez inicjatorów zgniotu, strzałkami zaznaczono miejsca niesymetrycznego składania się konstrukcji [116]	55
Rys. 20. Przykłady wybranych inicjatorów zgniotu wykonywanych poprzez obróbkę plastyczną: a) absorber aluminiowy o przekroju plastra miodu (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2015r.); b) stalowy absorber wykorzystywany w pociągach kolejowych ze wstępnie zdeformowaną częścią czołową (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2016r.); c) stalowy absorber z inicjatorem zgniotu wykonanym w technologii kształtowania za pomocą cieczy, tzw. hydroformowanie [39]	55
Rys. 21 Widoki absorbera energii mechanicznej stosowanego w pociągach Pendolino ED250: a) widok z przodu oraz b) widok od strony mocowania do pociągu z widocznymi inicjatorami zgniotu w postaci wewnętrznych przegród (fot. Paweł Prochenka, Warszawa 2022 r.).....	56
Rys. 22. Widok absorberów energii mechanicznej wykonanych z aluminium z dodatkową strukturą z włókien węglowych a) (fot. Paweł Prochenka, Targi Materiałów Kompozytów COMPOSITE EUROPE, Dusseldorf 2016 r.), słupek boczny wykonany ze stali AHSS z przyklejonym elementem z włókien węglowych b) (fot. Paweł Prochenka, Targi Materiałów Kompozytów COMPOSITE EUROPE, Dusseldorf 2016 r.) oraz absorber kolumnowy wykonany z elementów aluminiowych i włókna węglowego wykorzystywany w lokomotywie hybrydowej Hitachi c) (fot. Paweł Prochenka, Targi Kolejowe INNOTRANS, Berlin 2022 r.)	56
Rys. 23. Miejsca mocowania kolumnowych struktur energochłonnych w pojazdach drogowych i szynowych [100].....	57
Rys. 24. Widok absorberów energii mechanicznej stosowanych w pojazdach szynowych (fot. Paweł Prochenka, Siedlce, 2016 r.)	57
Rys. 25. Widoki przykładowego stanowiska do osiowego zgniatania absorberów mechanicznych z bijakiem o masie 283 kg [104]	59
Rys. 26. Geometria próbek materiałowych do badań wytrzymałościowych na rozciąganie: próbka niespawana a) i próbka spawana laserowo b).....	68
Rys. 27. Widok arkusza blachy z wyciętymi półfabrykatami a) oraz sposób ich oznaczania za pomocą procesu znakowania laserowego b)	70
Rys. 28 . Widok z góry krawędzi ciętej z widoczną strefą oddziaływania cieplnego a) oraz widok powierzchni ciętych dwóch blach - górna walcowana termomechanicznie oraz dolna zimnowalcowana b).....	70
Rys. 29. Widok półfabrykatów pospawanych laserowo przed wycinaniem elektroerozyjnym a) i po wycinaniu elektroerozyjnym b)	71

Rys. 30. Widok wyciętych próbek materiałowych z oznaczonymi wymiarami złączy pomiędzy próbkami	72
Rys. 31. Geometria miniaturowego absorbera energii mechanicznej	73
Rys. 32. Widok szlifierki do płaszczyzn G+H Schleiftechnik	74
Rys. 33. Widok prasy krawędziowej TRUMF TruBend 7036 a) oraz widok narzędzi kształtujących wraz z obrabianym detalem podczas procesu gięcia b).....	74
Rys. 34. Stanowisko spawalnicze wyposażone w spawarkę EWM oraz montażowy stół spawalniczy a) oraz widok korpusów absorberów z wykonanymi spoinami szepnymi b)	75
Rys. 35. Widok części roboczych prasy krawędziowej wraz z absorberem a) oraz widok korpusu absorbera wraz z wykonanym inicjatorem zgniotu b).....	76
Rys. 36. Widok spójczonowanych miniaturowych absorberów energii przed procesem cięcia elektroerozyjnego a) oraz widok końców absorberów z widoczną spoiną szepną oraz z zaznaczoną linią cięcia b).....	76
Rys. 37. Widok miniaturowych absorberów energii mechanicznej z przyklejonymi podkładkami ochronnymi	77
Rys. 38. Widok wnętrza celi spawalniczej wraz z wyposażeniem.....	78
Rys. 39. Widok przyrządu do spawania laserowego przygotowany z wykorzystaniem oprogramowania SolidWorks.	79
Rys. 40. Widok ogólny przyrządu spawalniczego z pozycjonowanymi i dociśniętymi półfabrykatami	80
Rys. 41. Graficzne odwzorowanie zaproponowanych w pracy wariantów procesu spawania: spawanie wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,3 mm a) lub 0,6 mm b), spawanie plamką procesową 0,3 mm ze wstępnym nagrzewaniem rozogniskowaną wiązką laserową c) d) oraz spawanie plamką procesową 0,3 mm z wygrzewaniem spoiny rozogniskowaną wiązką laserową e) f).....	82
Rys. 42. Widok urządzenia do spawania laserowego miniaturowych absorberów energii.....	83
Rys. 43. Widok projektora pomiarowego a), próbki na wyświetlaczu projektora z zaznaczonymi miejscami wykonania pomiaru przekroju poprzecznego (1, 2) b) oraz widok szablonu do pozycjonowania połówek próbki wytrzymałościowej c)	85
Rys. 44. Widok automatycznego mikrotwardościomierza Qness 10 CHD.....	86
Rys. 45. Widok przykładowych półfabrykatów a), zastosowanych preparatów w badaniu MT b) oraz widok defektoskopu magnetycznego podczas badania c)	87
Rys. 46. Mikroskop optyczny Keyence VHX-6000.....	88
Rys. 47. Maszyna wytrzymałościowa MTS Criterion 45 a) oraz widok uchwytów mocujących próbkę materiałową po jej zerwaniu b).....	89

Rys. 48. Stanowisko do testów dzielonego pręta Hopkinsona, schemat wariantu na rozciąganie z widocznymi uchwytami i próbką a) oraz rzeczywisty widok stanowiska badawczego b).....	90
Rys. 49. Widok czterech wersji uchwytów mocujących próbkę podczas testu Hopkinsona na rozciąganie (czerwoną ramką zaznaczono wersje rozwojowe uchwytów, zaś zieloną ramką końcową wersję).....	93
Rys. 50. Geometria układu mocującego próbkę materiałową podczas testu Hopkinsona na rozciąganie a) oraz widok uchwytów i elektrody wykończeniowej b) (kolorem zielonym zaznaczono próbkę materiałową)	93
Rys. 51. Widok stanowiska badawczego do quasi-statycznego zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej a) oraz widok uchwytów z zamontowanym między nimi miniaturowym absorberem energii mechanicznej b)	94
Rys. 52. Stanowisko Hopkinsona w konfiguracji „bezpośredniego uderzenia”: a) schemat stanowiska; b) widok stanowiska z zamocowanym absorberem i kamerą cyfrową Phantom v1612	96
Rys. 53. Widoki profili lica i grani złącz spawanych laserowo ze stali Strenx S700MC, dla dwóch średnic plamek procesowych – 0,3 i 0,6 mm.....	97
Rys. 54. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Strenx S700MC wykonanego wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,3 mm	99
Rys. 55. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Strenx S700MC wykonanego wiązką laserową o średnicy plamki procesowej 0,6 mm.	99
Rys. 56. Rozkłady mikrotwardości złącz wykonanych ze stali Strenx S700MC: a) spawanych laserowo plamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) oraz 0,6 mm.....	100
Rys. 57. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych równolegle (0°) względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	102
Rys. 58. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych prostopadle (90°) względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	103
Rys. 59. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm	

oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	104
Rys. 60. Widoki profili lica i grani złącz wykonanych ze stali Docol 800DP spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, 0,6 mm oraz 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem	105
Rys. 61. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 800DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm	106
Rys. 62. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 800DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm	107
Rys. 63. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 800DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm i wygrzanego po spawaniu.....	108
Rys. 64. Rozkłady mikrotwardości złącz wykonanych ze stali Docol 800DP: a) spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) 0,6 mm; c) oraz 0,3 mm z wygrzaniem złącza bezpośrednio po spawaniu	109
Rys. 65. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu oraz e) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia	111
Rys. 66. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu oraz e) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	112
Rys. 67. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	113
Rys. 68. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1000DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm.	114
Rys. 69. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1000DP wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm.	115

Rys. 70. Rozkłady mikrotwardości złącz wykonanych ze stali Docol 1000DP: a) spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) oraz 0,6 mm	116
Rys. 71. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia	118
Rys. 72. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia	119
Rys. 73. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia	120
Rys. 74. Widoki profili lica i grani złącz wykonanych ze stali Docol 1000DP spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym wstępnym podgrzaniem oraz z wygrzaniem po spawaniu	121
Rys. 75. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm	122
Rys. 76. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm	123
Rys. 77. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M, wykonanego poprzez wcześniejsze podgrzanie materiału wiązką laserową, a następnie pospawanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm.....	123
Rys. 78 . Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1200M, spawanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanego wiązką laserową bezpośrednio po spawaniu	124
Rys. 79. Rozkłady mikrotwardości złącz wykonanych ze stali Docol 1200M: a) spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm; b), 0,6 mm; c) 0,3 mm z wcześniej podgrzaniem materiału poprzez skanowanie wiązką laserową; d) oraz 0,3 mm z wygrzaniem złącza bezpośrednio po spawaniu	125

Rys. 80. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	127
Rys. 81. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	128
Rys. 82. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	129
Rys. 83. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm.	131
Rys. 84. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M wykonanego płamką procesową o średnicy 0,6 mm.	131
Rys. 85. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M podgrzewanej i spawana płamką procesową o średnicy 0,3 mm.....	132
Rys. 86. Zdjęcia mikrostruktury złącza spawanego stali Docol 1500M, wykonanego poprzez wcześniejsze podgrzanie materiału wiązką laserową, a następnie pospawanego płamką procesową o średnicy 0,3 mm.....	133
Rys. 87. Rozkłady mikrotwardości złącz wykonanych ze stali Docol 1500M: a) spawanych laserowo płamką procesową o średnicy 0,3 mm; b) 0,6 mm; c) 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem materiału poprzez skanowanie wiązką laserową; oraz d) 0,3 mm z wygrzaniem złącza bezpośrednio po spawaniu	135
Rys. 88. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem 0° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych	

wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	137
Rys. 89. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem 90° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, d) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm, a następnie wygrzanych po spawaniu, e) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm z wcześniejszym podgrzaniem spawanych blach oraz f) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	138
Rys. 90. Quasi-statyczne i dynamiczne krzywe rozciągania próbek wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem 45° względem kierunku walcowania materiału: a) niespawanych; b) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,6 mm; c) spawanych wiązką laserową o średnicy 0,3 mm oraz d) wartości średniego wydłużenia całkowitego dla poszczególnych warunków spawania i poziomów szybkości odkształcenia.....	139
Rys. 91. Wpływ warunków spawania na wartość naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Strenx S700MC (Kolorem znacznika oznaczono poziom szybkości odkształcenia, geometrię - kierunek wycinania próbek)	142
Rys. 92. Wpływ warunków spawania na wartości naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 800DP	143
Rys. 93. Wpływ warunków spawania na wartość naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 1000DP	143
Rys. 94. Wpływ warunków spawania na wartości naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 1200M	144
Rys. 95. Wpływ warunków spawania na wartości naprężenia maksymalnego a) oraz wydłużenia całkowitego b) stali Docol 1500M	144
Rys. 96. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych wykonanych ze stali Strenx S700MC dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia	146
Rys. 97. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 800DP dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia.....	148

Rys. 98. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 1000DP dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia.....	149
Rys. 99. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 1200M dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia.....	151
Rys. 100. Zmiany wartości naprężenia maksymalnego oraz wydłużenia całkowitego ϵ_c i wydłużenia równomiernego ϵ_r próbek niespawanych i spawanych ze stali Docol 1500M dla orientacji wycinania 0°: a), b), 90°: c), d) oraz 45°: e), f) w funkcji szybkości odkształcenia.....	152
Rys. 101. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złącz spawanych wykonanych ze stali Strenx S700MC wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wartości parametru $m_{0,02}$ zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I (0,001÷1 s ⁻¹) oraz II (1÷10 ³ s ⁻¹)....	154
Rys. 102. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złącz spawanych wykonanych ze stali Docol 800DP wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I (0,001÷1 s ⁻¹) oraz II (1÷10 ³ s ⁻¹)	155
Rys. 103. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złącz spawanych wykonanych ze stali Docol 1000DP wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I (0,001÷1 s ⁻¹) oraz II (1÷10 ³ s ⁻¹).....	156
Rys. 104. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złącz spawanych wykonanych ze stali Docol 1200M wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I (0,001÷1 s ⁻¹) oraz II (1÷10 ³ s ⁻¹)	157
Rys. 105. Wrażliwość na szybkość odkształcenia materiału rodzimego oraz złącz spawanych wykonanych ze stali Docol 1500M wycinanych pod kątem: 0° a), 90° b), 45° c); wyniki zestawiono dla dwóch zakresów szybkości odkształcenia: I (0,001÷1 s ⁻¹) oraz II (1÷10 ³ s ⁻¹)	158
Rys. 106. Względna energia deformacji złącz spawanych oraz materiału rodzimego stali Strenx S700MC dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c).....	159
Rys. 107. Względna energia deformacji złącz spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 800DP dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)	160
Rys. 108. Względna energia deformacji złącz spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 1000DP dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c).....	161
Rys. 109. Względna energia deformacji złącz spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 1200M dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)	161
Rys. 110. Względna energia deformacji złącz spawanych oraz materiału rodzimego stali Docol 1500M dla orientacji: 0° a), 90° b) oraz 45° c)	162

Rys. 111. Rozkłady mikrotwardości złącz spawanych laserowo wykorzystywanych w miniaturowych absorberach energii wykonanych ze stali: Strenx S700M, Docol 800DP, Docol 1000DP, Docol 1200M i Docol 1500M	166
Rys. 112. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Strenx S700MC w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3).....	167
Rys. 113. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 800DP w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3).....	168
Rys. 114. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 1000DP w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3).....	168
Rys. 115. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 1200M w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o wartości 35 mm (2) oraz skrócenia o wartości 70 mm (3).....	168
Rys. 116. Krzywe zgniatania miniaturowych absorberów wykonanych ze stali Docol 1500M w warunkach obciążenia quasi-statycznego, przebieg krzywej zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1) oraz skrócenia o wartości 35 mm (2) .	169
Rys. 117. Widoki absorberów po testach wykonanych w warunkach obciążenia quasi-statycznego z zaznaczonymi miejscami lokalizacji pęknięć dla materiałów: a) Strenx S700MC, b) Docol 800DP, c) Docol 1000DP, d) Docol 1200M, e) Docol 1500M	170
Rys. 118. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Strenx S700MC prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3).....	172
Rys. 119. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 800DP prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3).....	173

Rys. 120. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 1000DP prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3).....	173
Rys. 121. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 1200M prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3).....	174
Rys. 122. Wyniki testów zgniatania miniaturowych absorberów energii mechanicznej wykonanych ze stali Docol 1500M prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego: krzywe zgniatania (po lewej) oraz widoki zgniatanych absorberów (po prawej) dla siły zniszczenia (1), skrócenia o 35 mm (2) oraz skrócenia o 70 mm (3).....	174
Rys. 123. Porównanie zdjęć absorberów wykonanych ze stali Docol 1500M zarejestrowanych w chwili osiągnięcia siły zniszczenia podczas testu dynamicznego (po lewej) oraz quasi-statycznego (po prawej)	175
Rys. 124. Widoki absorberów po testach zgniatania w warunkach obciążenia dynamicznego z zaznaczonymi miejscami pęknięć dla badanych materiałów: a) Strenx S700MC, b) Docol 800DP, c) Docol 1000DP, d) Docol 1200M, e) Docol 1500M	176

BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/>.14.08.2022
- [2] <https://extranet.who.int/roadsafety/death-on-the-roads/>.14.08.2022
- [3] C. Lesch, N. Kwiaton, F.B. Klose, Advanced High Strength Steels (AHSS) for Automotive Applications – Tailored Properties by Smart Microstructural Adjustments, *Steel Res. Int.* 88 (2017) 1–21. <https://doi.org/10.1002/srin.201700210>.
- [4] Mahmoud Y. Demeri, Advanced High Strength Steel. Science, Technology, and Applications, (2013).
- [5] E. Brünger, O. Engler, J. Hirsch, Al-Mg-Si sheet alloys for autobody applications, *Virtual Prod. Ind. Alum. Prod.* Wiley-VCH. (2006) 51–64.
- [6] Porsche Engineering Services, UltraLight Steel Auto Body Final Engineering Report, Phase 2. (1995) 94–135.
- [7] J. Rowe, Advanced materials in automotive engineering, First, Woodhead Publishing Limited, Philadelphia, 2012. <https://doi.org/10.1533/9780857095466>.
- [8] C.M. Tamarelli, AHSS 101: the evolving use of advanced high-strength steel for automotive applications, *Steel Mark. Dev. Inst.* (2011).
- [9] World Auto Steel, Future Steel Vehicle, Final Engineering Report, (2011) 886. <https://steel.org/~media/Files/Autosteel/Programs/FutureSteelVehicle/FSV - Final Engineering Report.pdf>.
- [10] G. Jha, S. Das, S. Sinha, A. Lodh, A. Haldar, M. Williams, R. Minjares, M.L. Gipiela, Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0, *Mater. Sci. Forum.* 500–501 (2005) 151–154. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.4744>.
- [11] J. Senkara, Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego i wytyczne technologiczne ich zgrzewania, *Przegląd Spaw.* (2009) 3–7.
- [12] A. Grajcar, Nowoczesne stale wysokowytrzymałe dla motoryzacji I generacji, (2013).
- [13] P. Kaczyński, E. Rusiński, Ocena wytrzymałości połączeń punktowych w cienkościennych strukturach energochłonnych, 2014. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [14] T.E. Falkenreck, M. Klein, T. Böllinghaus, Dynamic compressive behaviour of weld joints, *Mater. Sci. Eng. A.* 702 (2017) 322–330.

- <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.032>.
- [15] A. Kurc-Lisiecka, A. Lisiecki, Laser welding of the new grade of advanced high-strength steel Domex 960, *Mater. Technol.* 51 (2017) 199–204.
<https://doi.org/10.17222/mit.2015.158>.
- [16] A. Qaban, Review on Hot and Control Rolling of HSLA Steel, *Curr. Trends Civ. Struct. Eng.* 3 (2019) 3–5. <https://doi.org/10.33552/ctcse.2019.03.000570>.
- [17] J. Nowacki, Microstructure and mechanical properties of advanced High – strength steels (AHSS), *Weld. Technol. Rev.* (2011) 22–27.
- [18] D. Shi, P. Hu, L. Ying, Comparative study of ductile fracture prediction of 22MnB5 steel in hot stamping process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2015) 895–906.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7754-2>.
- [19] <https://www.schulergroup.com/04.12.2017>
- [20] L. Liu, B. He, M. Huang, The Role of Transformation-Induced Plasticity in the Development of Advanced High Strength Steels, *Adv. Eng. Mater.* 20 (2018).
<https://doi.org/10.1002/adem.201701083>.
- [21] A. Grajcar, Obróbka cieplna wysokowytrzymałych stali wielofazowych, *Stal, Met. Nowe Technol.* nr 11-12 (2017) 15–19.
<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-d83e0524-a500-4ac2-b495-9bce715f9090>.
- [22] UDDEHOLM, SSAB, Tooling solutions for advanced high strength steels, UDDEHOLM Tool. AB. (2015) 1–39.
- [23] <https://www.autoevolution.com/17.09.2022>
- [24] B.C. De Cooman, K. Chin, J. Kim, High Mn TWIP Steels for Automotive Applications, in: *New Trends Dev. Automot. Syst. Eng.*, 2011.
<https://doi.org/10.5772/14086>.
- [25] <https://www.worldautosteel.org/26.07.2020>.
- [26] D.K. Matlock, J.G. Speer, Third Generation of AHSS: Microstructure Design Concepts, *Microstruct. Texture Steels*. (2009) 185–205. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-454-6_11.
- [27] <https://www.ssab.com/20.04.2018>
- [28] <https://corporate.arcelormittal.com/20.04.2018>

- [29] T. Rahmaan, C. Butcher, A. Abedini, A.M. Worswick, Effect of strain rate on shear properties and fracture characteristics of DP600 and AA5182-O sheet metal alloys, in: EPJ Web Conf., 2015. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401033>.
- [30] H. Yu, Y. Guo, X. Lai, Rate-dependent behavior and constitutive model of DP600 steel at strain rate from 10^{-4} to 10^3 s⁻¹, Mater. Des. 30 (2009) 2501–2505. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.001>.
- [31] N.K. Singh, E. Cadoni, M.K. Singha, N.K. Gupta, Dynamic tensile behavior of multi phase high yield strength steel, Mater. Des. 32 (2011) 5091–5098. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.027>.
- [32] Y. Li, R. Song, L. Jiang, Z. Zhao, Deformation response of 1200 MPa grade martensite-ferrite dual-phase steel under high strain rates, Mater. Sci. Eng. A. 750 (2019) 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.042>.
- [33] S. Oliver, T.B. Jones, G. Fournalis, Dual phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing, Mater. Charact. 58 (2007) 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.07.004>.
- [34] S. Curtze, V.T. Kuokkala, M. Hokka, P. Peura, Deformation behavior of TRIP and DP steels in tension at different temperatures over a wide range of strain rates, Mater. Sci. Eng. A. (2009). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.050>.
- [35] J. Qin, R. Chen, X. Wen, Y. Lin, M. Liang, F. Lu, Mechanical behaviour of dual-phase high-strength steel under high strain rate tensile loading, Mater. Sci. Eng. A. 586 (2013) 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.091>.
- [36] A.S. Khan, M. Baig, S.-H. Choi, H.-S. Yang, X. Sun, Quasi-static and dynamic responses of advanced high strength steels: Experiments and modeling, Int. J. Plast. 30–31 (2012) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.08.004>.
- [37] H. Cai, R. Song, L. Jiang, R. Wei, Y. Li, W. Niu, Plastic deformation behavior and construction of constitutive model in a wide range of strain rates of 800 MPa grade dual phase steel, Mech. Mater. 122 (2018) 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2018.04.009>.
- [38] J. Van Slycken, P. Verleysen, J. Degrieck, J. Bouquerel, B.C. De Cooman, Crashworthiness characterization and modelling of high-strength steels for automotive applications, Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. 220 (2006) 391–400.

- <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO26>.
- [39] N. Abedrabbo, R. Mayer, A. Thompson, C. Salisbury, M. Worswick, I. van Riemsdijk, Crash response of advanced high-strength steel tubes: Experiment and model, *Int. J. Impact Eng.* 36 (2009) 1044–1057. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.02.006>.
- [40] V. Tarigopula, O.S. Hopperstad, M. Langseth, A.H. Clausen, F. Hild, A study of localisation in dual-phase high-strength steels under dynamic loading using digital image correlation and FE analysis, *Int. J. Solids Struct.* 45 (2008) 601–619. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.08.021>.
- [41] H. Yu, Y. Guo, K. Zhang, X. Lai, Constitutive model on the description of plastic behavior of DP600 steel at strain rate from 10^{-4} to 10^3 s⁻¹, *Comput. Mater. Sci.* 46 (2009) 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.01.025>.
- [42] J. Liang, Z. Zhao, H. Wu, C. Peng, B. Sun, B. Guo, J. Liang, D. Tang, Mechanical behavior of two ferrite-martensite dual-phase steels over a broad range of strain rates, *Metals (Basel)*. 8 (2018) 1–14. <https://doi.org/10.3390/met8040236>.
- [43] J.-H. Kim, D. Kim, H.N. Han, F. Barlat, M.-G. Lee, Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling, *Mater. Sci. Eng. A.* 559 (2013) 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.087>.
- [44] H. Huh, S.B. Kim, J.H. Song, J.H. Lim, Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body, *Int. J. Mech. Sci.* 50 (2008) 918–931. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.09.004>.
- [45] W. Wang, M. Li, C. He, X. Wei, D. Wang, H. Du, Experimental study on high strain rate behavior of high strength 600–1000MPa dual phase steels and 1200MPa fully martensitic steels, *Mater. Des.* 47 (2013) 510–521. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.068>.
- [46] A. Uenishi, Y. Kuriyama, H. Yoshida, M. Takahashi, Material characterization at high strain rates for optimizing car body structures for crash events, *Nippon Steel Tech. Rep.* (2003) 22–26.
- [47] S.L. Costa, J.P. Mendonça, N. Peixinho, Study on the impact behaviour of a new safety toe cap model made of ultra-high-strength steels, *Mater. Des.* 91 (2016) 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.082>.
- [48] N. Sen, G. Durucan, O. Elkoca, İ. Uygur, Mechanical properties of ultra-high-strength

- steels at elevated temperatures, Ironmak. Steelmak. (2019).
<https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1683699>.
- [49] J.-H. Yoon, H. Huh, S.-H. Kim, S.-H. Park, Comparative Crashworthiness Assessment of the ULSAB-AVC Model with Advance High Strength Steel and with Low Strength Steel, Trans. Korean Soc. Automot. Eng. 14 (2006) 22–27.
- [50] S. Eva, C. Bohumil, H. Petr, Dynamic Fracture Behavior of the Martensitic High Strength Steel after Spot Welding, Mater. Today Proc. 3 (2016) 1156–1160.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.03.014>.
- [51] X. Xue, A.B. Pereira, J. Amorim, J. Liao, Effects of pulsed Nd: YAG laser welding parameters on penetration and microstructure characterization of a DP1000 steel butt joint, Metals (Basel). 7 (2017). <https://doi.org/10.3390/met7080292>.
- [52] J. Ion, Laser Processing of Engineering Materials, 2005. [https://doi.org/10.1016/0301-679x\(77\)90212-2](https://doi.org/10.1016/0301-679x(77)90212-2).
- [53] P.K. Mallick, Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles, 2010.
<https://doi.org/10.1533/9781845697822>.
- [54] P. Kah, M. Pirinen, R. Suoranta, J. Martikainen, Welding of Ultra High Strength Steels, Adv. Mater. Res. 849 (2013) 357–365.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.849.357>.
- [55] D. Dong, Y. Liu, Y. Yang, J. Li, M. Ma, T. Jiang, Microstructure and dynamic tensile behavior of DP600 dual phase steel joint by laser welding, Mater. Sci. Eng. A. 594 (2014) 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.047>.
- [56] R. Rana, S.B. Singh, Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications, 2016.
- [57] J. Pilarczyk, S. Stano, M. Banasik, J. Dworak, Wykorzystanie technik laserowych do spawania elementów o małych wymiarach w centrum laserowym instytutu spawalnictwa, Probl. Eksploat. (2011) 207–216.
- [58] T. Kovacs, Laser welding process specification base on welding theories, Procedia Manuf. 22 (2018) 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.023>.
- [59] F. Forouzan, E. Vuorinen, F. Mücklich, Post weld-treatment of laser welded AHSS by application of quenching and partitioning technique, Mater. Sci. Eng. A. 698 (2017) 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.053>.

- [60] S. Kumar, G.P. Chaudhari, S.K. Nath, B. Basu, Effect of preheat temperature on weldability of martensitic stainless steel, *Mater. Manuf. Process.* 27 (2012) 1382–1386. <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.700150>.
- [61] W.P.R. Iii, *Metalworking: Sheet Forming*, 2018. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14b.9781627081863>.
- [62] N. Ahmed, *New Developments in Advanced Welding*, 2005. <https://doi.org/10.1533/9781845690892>.
- [63] S. Katayama, Introduction: Fundamentals of laser welding, in: *Handb. Laser Weld. Technol.*, 2013: pp. 3–16. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.3>.
- [64] L. Quintino, E. Assunção, Conduction laser welding, in: *Handb. Laser Weld. Technol.*, 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.139>.
- [65] M. Banasik, J. Dworak, Spawanie elektronowe i laserowe, in: *Porad. Inżyniera. Spaw.*, 2017.
- [66] <https://www.ipgphotonics.com/11.06.2022>.
- [67] R. Fabbro, Developments in Nd:YAG laser welding, in: *Handb. Laser Weld. Technol.*, 2013: pp. 47–72. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.47>.
- [68] J. Zhou, H.L. Tsai, Developments in pulsed and continuous wave laser welding technologies, in: *Handb. Laser Weld. Technol.*, 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.103>.
- [69] B. Gefvert, J. Wallace, G. Overton, A. Noguee, Annual Laser Market Review & Forecast 2019, <https://www.laserfocusworld.com>. (2019).
- [70] B. Samson, L. Dong, Fiber lasers, in: *Handb. Solid-State Lasers Mater. Syst. Appl.*, 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857097507.2.403>.
- [71] H. Gong, S. Wang, P. Knysh, Y.P. Korkolis, Experimental investigation of the mechanical response of laser-welded dissimilar blanks from advanced- and ultra-high-strength steels, *Mater. Des.* 90 (2016) 1115–1123. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.057>.
- [72] D. Dong, Y. Liu, L. Wang, Y. Yang, D. Jiang, R. Yang, W. Zhang, Microstructure and deformation behavior of laserwelded dissimilar dual phase steel joints, *Sci. Technol. Weld. Join.* 21 (2016) 75–82. <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.00000000067>.
- [73] A. Schrek, P. Švec, V. Gajdošová, Deformation properties of tailor-welded blank made

- of dual phase steels, *Acta Mech. Autom.* 10 (2016) 38–42. <https://doi.org/10.1515/ama-2016-0007>.
- [74] K. Bandyopadhyay, S.K. Panda, P. Saha, G. Padmanabham, Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation, *J. Mater. Process. Technol.* 217 (2015) 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.10.022>.
- [75] V.V.N. Satya Suresh, S.P. Regalla, A.K. Gupta, G. Padmanabham, Weld Line Shift in the Case of Tailor Welded Blanks Subjected to Differential Strengths with Respect to TIG and Laser Welding, *Mater. Today Proc.* 2 (2015) 3501–3510. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.326>.
- [76] K. Bandyopadhyay, M.G. Lee, S.K. Panda, P. Saha, J. Lee, Formability assessment and failure prediction of laser welded dual phase steel blanks using anisotropic plastic properties, *Int. J. Mech. Sci.* 126 (2017) 203–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.03.022>.
- [77] Q.L. Cui, D. Parkes, D. Westerbaan, S.S. Nayak, Y. Zhou, D.C. Saha, D. Liu, F. Goodwin, S. Bhole, D.L. Chen, Tensile and Fatigue Properties of Single and Multiple Dissimilar Welded Joints of DP980 and HSLA, *J. Mater. Eng. Perform.* 26 (2017) 783–791. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2454-0>.
- [78] M. XIA, E. BIRO, Z. TIAN, N. ZHOU, Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual Phase Steels, *ISIJ Int.* 48 (2008) 809–814.
- [79] U. Reisgen, M. Schleser, O. Mokrov, E. Ahmed, Uni- and bi-axial deformation behavior of laser welded advanced high strength steel sheets, *J. Mater. Process. Technol.* (2010). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.003>.
- [80] M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert, A review on tailored blanks - Production, applications and evaluation, *J. Mater. Process. Technol.* 214 (2014) 151–164. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.015>.
- [81] J. Ma, F. Kong, B. Carlson, R. Kovacevic, Mitigating Zinc Vapor Induced Weld Defects in Laser Welding of Galvanized High-Strength Steel by Using Different Supplementary Means, *Weld. Process.* (2012) 117–138. <https://doi.org/10.5772/53562>.
- [82] <https://ii-vi.com/06.11.2022>.
- [83] M. Naeem, Developments in laser microwelding technology, in: *Handb. Laser Weld.*

- Technol., 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.163>.
- [84] M.F. Zaeha, J. Moesla, J. Musiola, F. Oefelea, Material processing with remote technology - Revolution or evolution?, *Phys. Procedia*. 5 (2010) 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.119>.
- [85] H. WANG, Applications of laser welding in the railway industry, in: *Handb. Laser Weld. Technol.*, 2013: pp. 596–612. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.4.596>.
- [86] E. Dębski, A. Szymański, Kontrola jakości w spawalnictwie, in: *Porad. Inżyniera. Spaw.*, Wydanie II, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2017.
- [87] M. Nilsen, Monitoring and control of laser beam butt joint welding, 2019. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1292567/FULLTEXT01.pdf>.
- [88] J. Janiszewski, Badania materiałów inżynierskich w warunkach obciążenia dynamicznego, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2012.
- [89] H. Kolsky, A.A.P. and L.J. S, An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading, *Proc. Phys. Soc. Sect. B*. 62 (1949) 676–700. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>.
- [90] T. Nicholas, Tensile testing of materials at high rates of strain, *Exp. Mech.* (1981). <https://doi.org/10.1007/bf02326644>.
- [91] J. Harding, E.O. Wood, J.D. Campbell, Tensile Testing of Materials at Impact Rates of Strain, *J. Mech. Eng. Sci.* (1960). https://doi.org/10.1243/jmes_jour_1960_002_016_02.
- [92] K. Ogawa, Impact-tension compression test by using a split-Hopkinson bar, *Exp. Mech.* (1984). <https://doi.org/10.1007/BF02324987>.
- [93] U.S. Lindholm, L.M. Yeakley, High strain-rate testing: Tension and compression, *Exp. Mech.* (1968). <https://doi.org/10.1007/bf02326244>.
- [94] M.A. Meyers, *Dynamic Behavior of Materials*, 1994. <https://doi.org/10.1002/9780470172278>.
- [95] P. Verleysen, J. Degrieck, T. Verstraete, J. Van Slycken, Influence of specimen geometry on split hopkinson tensile bar tests on sheet materials, *Exp. Mech.* 48 (2008) 587–598. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9149-x>.
- [96] H. Huh, W.J. Kang, S.S. Han, A tension split Hopkinson bar for investigating the dynamic behavior of sheet metals, *Exp. Mech.* (2002).

- <https://doi.org/10.1177/0018512002042001784>.
- [97] W.J. Kang, S.S. Cho, H. Huh, D.T. Chung, Identification of dynamic behavior of sheet metals for an auto-body with tension split Hopkinson bar, *SAE Trans. J. Mater. Manuf.* 107 (1998) 908–913. <https://doi.org/10.4271/981010.S>.
- [98] M. Borsutzki, D. Cornette, Y. Kuriyama, A. Uenishi, B. Yan, E. Opbroek, Recommendations for dynamic tensile testing of sheet steels, *Int. Iron Steel Inst.* 30 (2005).
- [99] N. Ledford, H. Paul, G. Ganzenmüller, M. May, M. Höfemann, M. Otto, N. Petrinic, Investigations on specimen design and mounting for Split Hopkinson Tension Bar (SHTB) experiments, *EPJ Web Conf.* 94 (2015) 1–6. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401049>.
- [100] J. Marsolek, H.G. Reimerdes, Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns, in: *Int. J. Impact Eng.*, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.06.006>.
- [101] A.G. Hanssen, M. Langseth, O.S. Hopperstad, Static crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler, *Int. J. Mech. Sci.* (1999). [https://doi.org/10.1016/s0020-7403\(98\)00064-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7403(98)00064-2).
- [102] L. Ying, X. Zhao, M. Dai, S. Zhang, P. Hu, Crashworthiness design of quenched boron steel thin-walled structures with functionally graded strength, *Int. J. Impact Eng.* 95 (2016) 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.05.001>.
- [103] M. Bambach, L. Conrads, M. Daamen, O. Güvenç, G. Hirt, Enhancing the crashworthiness of high-manganese steel by strain-hardening engineering, and tailored folding by local heat-treatment, *Mater. Des.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.065>.
- [104] P. Larour, J. Lackner, L. Wagner, Influence of single hat crash box flange triggering and impactor top plate welding strategy on axial crash foldability of AHSS & UHSS sheets, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 651 (2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/651/1/012023>.
- [105] B. Müller, M. Schagerl, K.U. Schröder, Prediction of the collapse mode of axially crushed profiles, *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.* (2013). <https://doi.org/10.1680/stbu.12.00058>.

- [106] C.P. Kohar, M. Cherkaoui, H. El Kadiri, K. Inal, Numerical modeling of TRIP steel in axial crashworthiness, *Int. J. Plast.* 84 (2015) 224–254.
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.05.010>.
- [107] M.D. White, N. Jones, Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections, *Int. J. Mech. Sci.* (1999). [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(98\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00047-2).
- [108] E. Rusiński, A. Kopczyński, J. Czmochowski, Tests of thin-walled beams joined by spot welding, in: *J. Mater. Process. Technol.*, 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.063>.
- [109] W. Liu, J. Lian, S. Münstermann, C. Zeng, X. Fang, Prediction of crack formation in the progressive folding of square tubes during dynamic axial crushing, *Int. J. Mech. Sci.* (2020) 105534. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105534>.
- [110] G. Chen, T. Link, M. Shi, T. Tyan, R. Gao, P. McKune, Axial crash testing and finite element modeling of a 12-sided steel component, in: *SAE Tech. Pap.*, 2010.
<https://doi.org/10.4271/2010-01-0379>.
- [111] D. Zhang, Q. Fei, J. Liu, D. Jiang, Y. Li, Crushing of vertex-based hierarchical honeycombs with triangular substructures, *Thin-Walled Struct.* 146 (2020) 106436.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106436>.
- [112] S. Santosa, T. Wierzbicki, Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam, *Comput. Struct.* 68 (1998) 343–367.
[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00067-4).
- [113] D. Frómeta, A. Lara, S. Molas, D. Casellas, J. Rehrl, C. Suppan, P. Larour, J. Calvo, On the correlation between fracture toughness and crash resistance of advanced high strength steels, *Eng. Fract. Mech.* (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.10.005>.
- [114] T.M. Link, B.M. Hance, Axial and bending crash performance of advanced high-strength steels, in: *Int. Symp. New Dev. Adv. High-Strength Sheet Steels*, 2017.
- [115] V. Tarigopula, M. Langseth, O.S. Hopperstad, A.H. Clausen, Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections, *Int. J. Impact Eng.* 32 (2006) 847–882.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.07.010>.
- [116] W. Abramowicz, Thin-walled structures as impact energy absorbers, *Thin-Walled*

- Struct. 41 (2003) 91–107. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(02\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(02)00082-4).
- [117] S.B. Bodlani, S. Chung Kim Yuen, G.N. Nurick, The energy absorption characteristics of square mild steel tubes with multiple induced circular hole discontinuities-part I: Experiments, *J. Appl. Mech. Trans. ASME*. (2009). <https://doi.org/10.1115/1.3114971>.
- [118] P. Prochenka, J. Janiszewski, M. Kucewicz, Crash response of laser-welded energy absorbers made of docol 1000dp and docol 1200m steels, *Materials (Basel)*. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14112808>.
- [119] S. Oliver, T.B. Jones, G. Fournalis, Dual phase versus TRIP strip steels: comparison of dynamic properties for automotive crash performance, *Mater. Sci. Technol.* 23 (2007) 423–431. <https://doi.org/10.1179/174328407X168937>.
- [120] A. Ozgowicz, Próby spawania laserowego niskostopowej wysokowytrzymałej stali o strukturze martenzytycznej The study of laser welding low alloy high strength steel with a martensitic structure, 88 (2016) 24–27.
- [121] P. Larour, A. Bäumer, K. Dahmen, W. Bleck, Influence of strain rate, temperature, plastic strain, and microstructure on the strain rate sensitivity of automotive sheet steels, *Steel Res. Int.* 84 (2013) 426–442. <https://doi.org/10.1002/srin.201200099>.
- [122] A. Das, M. Ghosh, S. Tarafder, S. Sivaprasad, D. Chakrabarti, Micromechanisms of deformation in dual phase steels at high strain rates, *Mater. Sci. Eng. A*. 680 (2017) 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.101>.
- [123] L. Wagner, P. Larour, J. Lackner, H. Schauer, E. Berger, Characterizing axial crash foldability of AHSS & UHSS sheets by means of L-profile compression tests, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 651 (2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/651/1/012014>.

ZAŁĄCZNIK

Tabele z wynikami pomiarów geometrii próbek materiałowych i wartości wydłużenia równomiernego i całkowitego dla stali:

Strenx S700 MC

Docol 800 DP

Docol 1000 DP

Docol 1200 M

Docol 1500 M

Strenx S700MC														
Numer próbki	Rodzaj próbki	Kąt orientacji próbki	L_0 – dł. pomiarowa próbki przed zerwaniem (mm) b – szerokość próbki przed zerwaniem (mm) h – grubość próbki przed zerwaniem (mm) L_u – dł. pomiarowa próbki po zerwaniu (mm) b_1, b_2 – szerokości szyjek próbki po zerwaniu (mm) h_1, h_2 – grubości szyjek próbki po zerwaniu (mm)								ϵ_c – wydłużenie całkowite (–) $\bar{\epsilon}_c$ – średnie wydłużenie całkowite (–) ϵ_r – wydłużenie równomierne (–) $\bar{\epsilon}_r$ – średnie wydłużenie równomierne (–)			
			L_0	b	h	L_u	b_1	h_1	b_2	h_2	ϵ_c	$\bar{\epsilon}_c$	ϵ_r	$\bar{\epsilon}_r$
2599	niespawana (10^3 s^{-1})	0°	7,01	1,988	2,014	9,00	1,776	1,836	1,815	1,840	0,284	0,294	0,213	0,225
2600		0°	7,00	2,010	2,020	9,10	1,783	1,853	1,796	1,859	0,299		0,222	
2601		0°	7,01	1,990	2,018	9,08	1,772	1,842	1,826	1,836	0,295		0,214	
2603		0°	7,00	2,000	2,018	9,08	1,729	1,830	1,785	1,849	0,297		0,249	
2594		90°	7,00	2,001	2,022	8,92	1,853	1,794	1,774	1,835	0,274	0,282	0,230	0,219
2595		90°	7,01	1,965	2,016	9,17	1,836	1,770	1,825	1,793	0,308		0,215	
2596		90°	7,00	2,000	2,022	9,04	1,849	1,823	1,831	1,836	0,291		0,201	
2597		90°	7,03	1,998	2,027	8,93	1,820	1,797	1,836	1,809	0,270		0,229	
2598		90°	7,01	2,005	2,014	8,89	1,881	1,707	1,862	1,824	0,268	0,299	0,222	0,217
2604		45°	7,03	1,970	2,022	9,10	1,854	1,774	1,870	1,746	0,294		0,216	
2606		45°	7,00	1,986	2,019	9,06	1,874	1,795	1,836	1,764	0,294		0,215	
2607		45°	7,01	1,995	2,016	9,17	1,847	1,782	1,846	1,777	0,308		0,224	
2608		45°	7,02	1,985	2,020	9,12	1,892	1,787	1,851	1,744	0,299		0,213	
2878	spawana 0,6 (10^3 s^{-1})	0°	7,00	1,980	2,019	8,84	1,965	1,937	1,683	1,778	0,263	0,204	0,176	0,137
2879		0°	6,99	1,970	2,018	7,92	1,927	1,935	1,897	1,857	0,133		0,096	
2880		0°	7,01	1,994	2,019	8,04	1,920	1,902	1,888	1,863	0,147		0,123	
2881		0°	6,98	1,976	2,018	8,90	2,004	1,935	1,798	1,696	0,275		0,151	
2873		90°	6,99	1,980	2,019	7,83	1,924	1,875	1,926	1,875	0,120	0,135	0,108	0,102
2874		90°	6,99	1,971	2,027	7,85	1,928	1,879	1,929	1,906	0,123		0,095	
2875		90°	6,97	1,972	2,014	8,25	1,883	1,878	1,876	1,869	0,184		0,128	
2876		90°	6,98	1,972	2,018	7,78	1,936	1,889	1,921	1,912	0,115		0,086	
2877		90°	6,98	1,980	2,021	7,91	1,959	1,907	1,876	1,906	0,133	0,186	0,095	0,137
2882		45°	6,98	1,978	2,021	7,65	1,910	1,906	1,982	1,945	0,096		0,067	
2883		45°	6,99	1,980	2,019	8,85	1,955	1,906	1,800	1,727	0,266		0,170	
2884		45°	7,01	1,978	2,021	7,86	1,952	1,914	1,992	1,888	0,121		0,066	
2885		45°	6,99	1,976	2,020	8,81	1,934	1,915	1,848	1,677	0,260		0,174	
3072	spawana 0,3 (10^3 s^{-1})	0°	7,01	1,979	2,016	8,85	1,900	1,914	1,788	1,774	0,262	0,237	0,172	0,168
3073		0°	7,02	1,968	2,021	8,88	1,882	1,915	1,797	1,738	0,265		0,182	
3074		0°	7,01	1,973	2,019	7,82	1,912	1,924	1,927	1,924	0,116		0,079	
3075		0°	7,01	1,958	2,054	8,26	1,886	1,768	1,923	1,916	0,178		0,146	
3076		0°	7,01	1,964	2,020	8,71	1,948	1,920	1,726	1,752	0,243	0,183	0,173	0,119
3077		90°	7,02	1,960	2,083	8,22	1,898	1,868	1,890	1,850	0,171		0,160	
3078		90°	7,01	1,951	2,031	8,47	1,952	1,991	1,882	1,740	0,208		0,107	
3079		90°	7,00	1,966	2,023	8,09	1,925	1,862	1,929	1,881	0,156		0,103	
3080		90°	7,01	1,962	2,017	8,41	1,895	1,850	1,864	1,851	0,200	0,217	0,138	0,159
3081		90°	7,02	1,965	2,027	8,29	1,906	1,862	1,903	1,850	0,181		0,127	
3082		45°	7,02	1,967	2,019	7,84	1,998	1,936	1,997	1,939	0,117		0,026	
3083		45°	7,00	1,965	2,020	8,94	1,955	1,932	1,862	1,701	0,277		0,143	
3084		45°	7,02	1,952	2,015	9,04	1,958	1,925	1,836	1,628	0,288	0,217	0,164	0,159
3085		45°	7,01	1,962	2,022	8,74	1,951	1,930	1,830	1,647	0,247		0,170	
3086/3087		45°	7,01	1,967	2,020	8,11	1,969	1,914	1,960	1,913	0,157		0,057	

700.01	nieszpawana (10^{-3} s^{-1})	0°	7,00	1,980	2,000	9,23	1,859	1,826	1,850	1,808	0,319	0,287	0,175	0,183
700.02		0°	7,03	1,990	2,010	9,03	1,867	1,826	1,798	1,828	0,284		0,195	
700.03		0°	7,00	1,990	2,020	9,09	1,804	1,837	1,832	1,853	0,299		0,198	
700.211		0°	7,01	1,940	2,000	8,98	1,830	1,813	1,840	1,837	0,281		0,159	
700.212		0°	7,01	1,930	2,010	8,91	1,822	1,797	1,868	1,805	0,271		0,167	
700.213		0°	7,01	1,980	2,010	8,90	1,816	1,839	1,817	1,845	0,270		0,189	
700.11		90°	7,02	2,000	2,020	9,05	1,846	1,821	1,798	1,803	0,289	0,288	0,164	0,165
700.12		90°	7,02	1,990	2,020	9,01	1,876	1,862	1,865	1,827	0,283		0,165	
700.13		90°	7,03	1,950	2,010	9,08	1,868	1,788	1,863	1,818	0,292		0,166	
700.21	nieszpawana (10^{-3} s^{-1})	45°	7,03	1,990	2,000	9,18	1,858	1,767	1,864	1,853	0,306	0,308	0,182	0,191
700.22		45°	7,04	1,990	2,020	9,24	1,858	1,753	1,885	1,840	0,313		0,195	
700.23		45°	7,03	1,990	2,030	9,18	1,879	1,804	1,886	1,781	0,306		0,197	
700.113.S	spawana 0,6 (10^{-3} s^{-1})	0°	7,04	1,990	2,020	9,03	1,938	1,895	1,847	1,778	0,283	0,274	0,156	0,163
700.114.S		0°	7,03	1,990	2,010	8,93	1,980	1,938	1,789	1,742	0,270		0,150	
700.115.S		0°	7,04	1,990	2,020	8,94	1,736	1,751	1,935	1,943	0,270		0,182	
700.101.S		90°	7,03	1,990	2,010	7,82	1,901	1,903	1,901	1,885	0,112	0,120	0,111	0,117
700.102.S		90°	7,03	1,980	2,020	7,85	1,908	1,883	1,889	1,900	0,117		0,119	
700.103.S		90°	7,04	1,990	2,020	7,83	1,894	1,872	1,903	1,899	0,112		0,123	
700.104.S		90°	7,02	1,990	2,020	7,98	1,921	1,894	1,875	1,901	0,137		0,116	
700.121.S		45°	7,02	1,980	2,030	8,05	1,894	1,842	1,933	1,858	0,147	0,180	0,135	0,137
700.122.S		45°	7,02	1,980	2,020	8,93	1,954	1,943	1,891	1,695	0,272		0,142	
700.123.S		45°	7,02	1,980	2,020	7,88	1,907	1,821	1,913	1,872	0,123		0,134	
700.300.S	spawana 0,3 (10^{-3} s^{-1})	0°	6,99	1,969	2,027	8,74	1,704	1,720	1,955	1,932	0,250	0,267	0,190	0,182
700.301.S		0°	7,00	1,988	2,026	8,99	1,756	1,775	1,925	1,947	0,284		0,173	
700.303.S		90°	6,99	1,963	2,032	8,05	1,853	1,858	1,875	1,859	0,152	0,141	0,151	0,136
700.304.S		90°	6,99	1,982	2,027	7,90	1,896	1,878	1,917	1,885	0,130		0,120	
700.306.S		45°	6,99	1,969	2,022	7,79	1,92	1,874	1,919	1,908	0,114	0,111	0,097	0,099
700.307.S		45°	6,99	1,971	2,027	7,74	1,894	1,866	1,967	1,895	0,107		0,100	
700.204	nieszpawana (1 s^{-1})	0°	7,02	1,667	2,019	8,94	1,739	1,507	1,883	1,584	0,274	0,274	0,201	0,195
700.205		0°	7,00	1,807	2,013	8,98	1,865	1,724	1,770	1,650	0,283		0,186	
700.206		0°	7,01	1,493	2,021	8,88	1,901	1,420	1,755	1,329	0,267		0,199	
700.201		90°	6,99	1,920	2,010	8,83	1,811	1,755	1,837	1,784	0,263	0,268	0,196	0,186
700.202		90°	7,02	1,980	2,010	8,95	1,844	1,825	1,861	1,829	0,275		0,176	
700.203		90°	7,00	1,980	2,020	8,87	1,865	1,856	1,819	1,802	0,267		0,187	
700.207		45°	6,99	1,921	2,011	9,10	1,857	1,758	1,852	1,717	0,302	0,283	0,199	0,196
700.208		45°	7,02	1,807	2,018	8,97	1,842	1,571	1,899	1,690	0,278		0,195	
700.209		45°	7,02	1,659	2,013	8,92	1,813	1,457	1,909	1,549	0,271		0,193	
700.310.S	spawana 0,6 (1 s^{-1})	0°	6,92	2,088	1,970	8,04	1,988	1,979	1,863	1,828	0,162	0,160	0,120	0,121
700.311.S		0°	6,93	2,020	2,022	8,02	1,909	1,818	1,982	1,887	0,157		0,123	
700.313.S		90°	6,96	2,011	2,010	7,65	1,911	1,951	1,920	1,979	0,098	0,099	0,073	0,074
700.314.S		90°	6,98	2,020	2,016	7,65	1,909	1,900	1,922	1,980	0,099		0,075	
700.316.S		45°	7,01	1,976	2,022	7,88	1,99	1,84	1,852	1,982	0,124	0,132	0,090	0,090
700.317.S		45°	7,00	1,966	2,022	7,98	1,93	1,87	1,848	1,992	0,140		0,091	
700.320.S		0°	7,00	1,962	2,026	8,52	1,794	1,818	1,884	1,887	0,217	0,228	0,166	0,169
700.321.S		0°	6,99	1,972	2,022	8,66	1,703	1,752	1,983	1,928	0,239		0,172	
700.323.S		90°	6,99	1,959	2,023	8,61	1,819	1,778	1,917	1,92	0,232	0,229	0,146	0,163
700.324.S		90°	7,00	1,954	2,025	8,59	1,871	1,857	1,838	1,758	0,227		0,180	
700.326.S	spawana 0,3 (1 s^{-1})	45°	6,99	1,968	2,029	8,98	1,851	1,641	1,958	1,932	0,285	0,276	0,171	0,173
700.327.S		45°	7,01	1,962	2,026	8,89	1,832	1,621	1,973	1,923	0,268		0,175	

Docol 800DP														
Numer próbki	Rodzaj próbki	Kąt orientacji próbki	L_0 – dł. pomiarowa próbki przed zerwaniem (mm) b – szerokość próbki przed zerwaniem (mm) h – grubość próbki przed zerwaniem (mm) L_u – dł. pomiarowa próbki po zerwaniu (mm) b_1, b_2 – szerokości szyjek próbki po zerwaniu (mm) h_1, h_2 – grubości szyjek próbki po zerwaniu (mm)								ε_c – wydłużenie całkowite(–) $\overline{\varepsilon}_c$ – średnie wydłużenie całkowite (–) ε_r – wydłużenie równomierne(–) $\overline{\varepsilon}_r$ – średnie wydłużenie równomierne (–)			
			L_0	b	h	L_u	b_1	h_1	b_2	h_2	ε_c	$\overline{\varepsilon}_c$	ε_r	$\overline{\varepsilon}_r$
2758	niespawana (10^3 s^{-1})	0°	7,01	1,990	2,020	9,302	1,718	1,882	1,805	1,885	0,327	0,326	0,212	0,212
2759		0°	6,99	1,960	2,030	9,203	1,801	1,890	1,787	1,888	0,317		0,174	
2760		0°	6,99	1,970	2,030	9,305	1,728	1,895	1,729	1,903	0,331		0,218	
2761		0°	6,97	1,980	2,020	9,304	1,784	1,883	1,788	1,870	0,335		0,193	
2762		0°	7,00	1,970	2,040	9,246	1,718	1,848	1,706	1,876	0,321		0,261	
2763		90°	7,00	1,980	2,040	9,098	1,830	1,787	1,891	1,826	0,300	0,293	0,202	0,203
2764		90°	7,02	1,980	2,040	9,104	1,819	1,804	1,858	1,787	0,297		0,224	
2765		90°	7,00	1,980	2,040	8,971	1,875	1,828	1,864	1,809	0,282		0,188	
2766		90°	6,99	1,980	2,050	9,054	1,884	1,812	1,885	1,836	0,295		0,181	
2767		90°	6,98	1,990	2,040	9,012	1,860	1,773	1,868	1,802	0,291		0,218	
2768		45°	6,98	1,990	2,040	9,305	1,877	1,861	1,875	1,799	0,333	0,335	0,182	0,208
2769		45°	6,99	1,990	2,040	9,198	1,897	1,815	1,805	1,778	0,316		0,221	
2770		45°	7,01	1,970	2,060	9,241	1,875	1,834	1,801	1,779	0,318		0,222	
2771		45°	7,00	1,970	2,060	9,772	1,855	1,808	1,876	1,781	0,396		0,212	
2772		45°	7,00	2,000	2,060	9,190	1,872	1,847	1,907	1,779	0,313		0,203	
2844	spawana 0,6 (10^3 s^{-1})	0°	7,03	1,990	2,017	7,555	1,883	1,971	1,889	1,961	0,075	0,173	0,083	0,134
2845		0°	7,03	1,986	2,012	8,382	1,875	1,890	1,862	1,905	0,192		0,127	
2846		0°	7,05	1,978	2,014	8,240	1,858	1,874	1,858	1,901	0,169		0,136	
2847		0°	7,05	1,989	2,017	8,373	1,893	1,864	1,908	1,880	0,188		0,128	
2848		0°	7,04	1,983	2,013	8,057	1,828	1,855	1,884	1,905	0,144		0,144	
2849		90°	7,02	1,983	2,068	8,108	2,042	1,937	1,710	1,831	0,155	0,163	0,157	0,130
2850		90°	7,00	1,977	2,053	8,175	1,860	1,867	1,976	1,908	0,168		0,121	
2851		90°	7,05	1,975	2,010	8,148	1,984	1,902	1,835	1,823	0,156		0,115	
2852		90°	7,01	1,977	2,051	8,130	2,077	1,905	1,737	1,826	0,160		0,138	
2853		90°	6,99	1,982	2,007	8,220	1,953	1,917	1,804	1,868	0,176		0,118	
2854		45°	7,04	1,977	2,007	7,010	1,910	1,898	1,897	1,876		0,201	0,105	0,146
2855		45°	7,02	1,969	2,007	8,369	1,902	1,812	2,038	1,761	0,192		0,123	
2856		45°	7,00	1,971	2,011	8,436	1,861	1,790	1,929	1,848	0,205		0,150	
2857		45°	7,04	1,968	2,053	8,449	1,772	1,819	1,991	1,825	0,200		0,178	
2858		45°	7,02	1,992	2,012	8,480	1,888	1,846	1,969	1,825	0,208		0,132	
3088	spawana 0,3 (10^3 s^{-1})	0°	7,03	1,972	1,997	8,490	1,818	1,751	1,931	1,902	0,208	0,193	0,149	0,155
3089		0°	7,00	1,975	1,999	7,900	1,863	1,828	1,962	1,904	0,129		0,106	
3090		0°	7,00	1,980	2,010	8,530	1,774	1,743	1,912	1,903	0,219		0,183	
3091		0°	7,00	1,965	2,003	7,870	1,914	1,918	1,922	1,887			0,079	
3092		0°	7,02	1,971	2,007	8,550	1,698	1,793	1,926	1,886	0,218		0,185	
3093		90°	7,00	1,974	2,024	8,110	1,892	1,856	1,955	1,844	0,159	0,159	0,123	0,139
3094		90°	7,02	1,960	2,010	8,070	1,940	1,841	1,904	1,830	0,150		0,117	
3095		90°	7,00	1,958	2,019	8,190	1,829	1,792	1,905	1,851	0,170		0,162	
3096		90°	7,01	2,008	2,039	8,090	1,875	1,830	1,952	1,874	0,154		0,155	
3098		45°	7,01	1,966	1,999	8,220	1,896	1,741	1,883	1,751	0,173	0,198	0,191	0,173
3099		45°	7,02	1,971	2,004	8,190	1,842	1,771	1,834	1,791	0,167		0,207	
3100		45°	7,03	1,958	2,014	8,560	1,794	1,843	1,852	1,782	0,218		0,194	
3101		45°	7,03	1,961	2,036	8,440	1,835	1,789	1,897	1,754	0,201		0,208	
3102		45°	7,02	1,974	2,008	8,660	1,870	1,726	1,846	1,726	0,234		0,236	

3103	wyrzewaną (10^{-3} s^{-1})	0°	7,01	1,985	2,012	8,150	1,835	1,807	1,935	1,884	0,163	0,178	0,147	0,130
3104		0°	7,00	2,007	2,007	8,370	1,898	1,936	1,883	1,858	0,196		0,123	
3105		0°	7,01	1,983	2,020	8,250	1,852	1,828	1,952	1,921	0,177		0,123	
3106		0°	7,03	1,981	2,039	8,070	1,980	1,837	1,909	1,854	0,148		0,126	
3107		0°	7,03	2,057	2,023	8,480	1,930	1,933	1,944	1,874	0,206		0,129	
3108		90°	7,01	1,975	2,041	8,110	1,940	1,889	1,899	1,840	0,157	0,146	0,126	0,122
3109		90°	7,00	1,983	2,020	8,260	1,990	1,887	1,885	1,842	0,180		0,108	
3111		90°	7,00	2,015	2,052	8,110	1,944	1,953	1,904	1,859	0,159		0,127	
3112		90°	7,01	2,025	2,044	7,620	1,898	1,939	1,940	1,897	0,087		0,125	
3113		90°	7,01	2,003	2,038	8,060	1,941	1,942	1,839	1,896	0,150		0,125	
800.11	niespawana (10^{-3} s^{-1})	0°	7,01	1,900	2,030	8,822	1,809	1,759	1,833	1,740	0,258	0,270	0,211	0,209
800.12		0°	7,02	1,990	2,040	8,971	1,848	1,835	1,793	1,836	0,278		0,215	
800.13		0°	7,03	1,950	2,030	8,944	1,885	1,791	1,811	1,771	0,272		0,203	
800.01		90°	7,00	1,990	2,050	8,866	1,876	1,876	1,799	1,879	0,267	0,238	0,183	0,175
800.02		90°	7,01	1,960	2,040	8,739	1,792	1,818	1,828	1,941	0,247		0,175	
800.03		90°	7,03	1,910	2,030	8,432	1,938	1,782	1,764	1,809	0,199		0,167	
800.21		45°	7,04	1,950	2,050	8,996	1,904	1,830	1,848	1,769	0,278	0,277	0,184	0,183
800.22		45°	7,04	1,960	2,040	8,985	1,899	1,824	1,862	1,767	0,276		0,184	
800.23		45°	7,02	1,950	2,050	8,974	1,932	1,839	1,822	1,768	0,278		0,180	
800.111.S	spawana 0,6 (10^{-3} s^{-1})	0°	7,01	1,990	2,010	7,990	1,881	1,891	1,919	1,899	0,140	0,141	0,111	0,122
800.104.S		0°	7,01	1,980	1,990	8,020	1,783	1,833	1,968	1,942	0,144		0,111	
800.105.S		0°	7,02	1,990	2,020	8,060	1,836	1,844	1,969	1,979	0,148		0,104	
800.112.S		0°	7,02	1,990	2,020	7,980	1,900	1,905	1,943	1,927	0,137		0,092	
800.113.S		0°	7,05	1,980	2,030	8,000	1,894	1,866	1,776	1,812	0,135		0,191	
800.106.S		90°	7,03	1,970	2,000	7,911	1,934	2,049	1,791	1,825	0,125	0,137	0,090	0,079
800.107.S		90°	7,03	1,990	1,970	8,034	1,908	2,021	1,806	1,829	0,143		0,095	
800.108.S		90°	7,03	1,980	1,950	8,042	1,945	2,037	1,792	1,881	0,144		0,053	
800.121.S		45°	7,02	1,970	2,010	8,110	1,898	1,788	1,948	1,919	0,155	0,150	0,110	0,128
800.122.S		45°	7,06	1,980	2,020	8,140	1,811	1,824	1,930	1,910	0,153		0,144	
800.123.S		45°	7,03	1,990	2,000	8,030	1,886	1,808	1,921	1,897	0,142		0,128	
800.161.S	spawana 0,3 (10^{-3} s^{-1})	0°	7,02	1,990	2,010	7,980	1,819	1,890	1,830	1,900	0,137	0,130	0,157	0,124
800.162.S		0°	6,99	1,960	1,990	7,880	1,890	1,901	1,833	1,870	0,127		0,111	
800.163.S		0°	7,04	1,960	2,010	7,920	1,849	1,880	1,841	1,992	0,125		0,103	
800.171.S		90°	6,99	1,980	2,020	7,570	1,899	1,925	1,957	1,908	0,083	0,085	0,083	0,071
800.172.S		90°	7,04	1,970	2,000	7,790	1,920	1,946	1,900	1,908	0,107		0,070	
800.173.S		90°	7,02	1,970	2,030	7,480	1,975	1,928	1,933	1,937	0,066		0,059	
800.174.S		45°	7,00	1,990	2,020	8,380	1,883	1,874	1,946	1,865	0,197	0,120	0,123	0,103
800.175.S		45°	6,99	1,970	1,990	7,340	1,903	1,941	1,947	1,920	0,050		0,055	
800.176.S		45°	7,00	1,960	2,000	7,780	1,949	1,874	1,780	1,844	0,111		0,131	
800.300.S	wyrzewaną (10^{-3} s^{-1})	0°	6,99	1,987	2,013	8,180	1,878	1,901	1,818	1,947	0,170	0,134	0,125	0,120
800.301.S		0°	6,99	2,028	2,029	7,670	1,872	1,905	1,901	2,005	0,097		0,115	
800.303.S		90°	6,99	1,989	2,036	7,770	1,998	1,976	1,941	1,952	0,112	0,119	0,047	0,074
800.304.S		90°	6,99	2,021	2,038	7,870	1,918	1,978	1,910	1,929	0,126		0,102	

800.213	nieszpawana (1 s^{-1})	0°	6,99	2,108	2,055	8,580	1,919	1,865	1,919	1,904	0,227	0,223	0,198	0,192
800.214		0°	6,98	2,126	2,040	8,560	1,902	1,883	1,914	1,923	0,226		0,194	
800.215		0°	6,98	2,142	2,038	8,480	1,920	1,896	1,915	1,948	0,215		0,185	
800.201		90°	6,99	1,780	2,010	8,212	1,875	1,618	1,915	1,717	0,175	0,165	0,132	0,135
800.202		90°	6,95	1,680	2,020	8,029	1,921	1,623	1,849	1,540	0,155		0,138	
800.206		45°	6,98	2,040	2,030	8,430	1,891	1,920	1,851	1,883	0,208	0,212	0,164	0,165
800.207		45°	6,99	2,020	2,010	8,507	1,870	1,905	1,898	1,792	0,217		0,166	
800.310.S	spawana 0,6 (1 s^{-1})	0°	6,99	2,069	2,049	7,990	1,951	1,821	2,025	2,034	0,143	0,132	0,105	0,104
800.311.S		0°	7,01	1,960	2,051	7,860	1,908	1,795	2,012	1,921	0,121		0,103	
800.140.S		90°	7,03	1,990	1,970	7,590	1,785	1,782	1,998	1,956	0,080	0,097	0,106	0,093
800.141.S		90°	7,02	1,982	1,980	7,530	1,844	1,894	1,964	1,963	0,073		0,068	
800.142.S		90°	7,00	1,957	2,006	7,980	1,831	1,866	1,949	1,896	0,140		0,104	
800.313.S		45°	7,00	2,026	2,059	7,753	2,046	1,961	1,951	1,921	0,108	0,088	0,075	0,076
800.314.S		45°	7,01	2,028	2,051	7,490	1,816	1,962	2,051	2,031	0,068		0,076	
800.320.S	spawana 0,3 (1 s^{-1})	0°	7,01	1,963	1,994	8,125	1,819	1,855	1,846	1,968	0,159	0,161	0,117	0,130
800.321.S		0°	6,99	1,971	2,016	8,281	1,772	1,842	1,931	1,924	0,185		0,139	
800.322.S		0°	7,00	1,979	1,987	7,981	1,828	1,799	1,899	1,919	0,140		0,134	
800.323.S		90°	6,99	1,988	2,035	7,670	1,844	1,803	1,961	1,899	0,097	0,121	0,148	0,108
800.324.S		90°	7,00	1,957	2,016	7,780	1,903	1,854	1,937	1,916	0,111		0,090	
800.325.S		90°	7,00	1,999	2,010	8,070	1,925	1,858	1,953	1,957	0,153		0,086	
800.326.S		45°	7,00	1,980	2,042	7,950	1,856	1,823	1,925	1,871	0,136	0,132	0,158	0,118
800.327.S		45°	7,00	1,957	2,018	7,790	1,912	1,829	1,944	1,878	0,113		0,105	
800.328.S		45°	6,99	1,952	2,006	8,020	1,852	1,841	1,970	1,913	0,147		0,091	
800.330.S	wygrzewana (1 s^{-1})	0°	7,00	1,975	2,019	8,090	1,754	1,868	1,943	1,931	0,156	0,143	0,135	0,122
800.331.S		0°	7,03	2,041	2,011	8,010	1,912	1,881	1,955	1,937	0,139		0,112	
800.332.S		0°	7,01	2,028	2,034	7,950	1,942	1,870	1,941	1,921	0,134		0,121	
800.333.S		90°	7,01	1,978	2,045	7,870	1,892	1,854	1,954	1,936	0,123	0,118	0,110	0,106
800.334.S		90°	6,99	1,970	2,035	7,520	1,958	1,833	1,944	1,926	0,076		0,093	
800.335.S		90°	7,00	2,041	2,046	8,090	1,908	1,911	1,953	1,966	0,156		0,116	

Docol 1000DP														
Numer próbki	Rodzaj próbki	Kąt orientacji próbki	L_0 – dł. pomiarowa próbki przed zerwaniem (mm) b – szerokość próbki przed zerwaniem (mm) h – grubość próbki przed zerwaniem (mm) L_u – dł. pomiarowa próbki po zerwaniu (mm) b_1, b_2 – szerokości szyjek próbki po zerwaniu (mm) h_1, h_2 – grubości szyjek próbki po zerwaniu (mm)								ϵ_c – wydłużenie całkowite (–) $\bar{\epsilon}_c$ – średnie wydłużenie całkowite (–) ϵ_r – wydłużenie równomierne (–) $\bar{\epsilon}_r$ – średnie wydłużenie równomierne (–)			
			L_0	b	h	L_u	b_1	h_1	b_2	h_2	ϵ_c	$\bar{\epsilon}_c$	ϵ_r	$\bar{\epsilon}_r$
2666	niespawana (10^3 s^{-1})	0°	7,00	2,027	2,009	8,960	1,848	1,862	1,823	1,856	0,280	0,271	0,193	0,195
2667		0°	7,00	2,007	2,014	8,860	1,806	1,833	1,856	1,867	0,266		0,193	
2668		0°	7,00	1,970	2,001	8,940	1,804	1,792	1,830	1,825	0,277		0,200	
2670		0°	7,00	2,023	1,982	8,830	1,806	1,866	1,797	1,859	0,261		0,195	
2671		90°	7,00	2,027	2,013	8,880	1,862	1,869	1,843	1,854	0,269	0,257	0,183	0,178
2672		90°	7,00	2,014	2,010	8,840	1,878	1,874	1,812	1,836	0,263		0,183	
2673		90°	7,00	1,984	2,011	8,700	1,881	1,850	1,823	1,806	0,243		0,178	
2674		90°	7,00	2,018	2,007	8,790	1,842	1,803	1,895	1,887	0,256		0,174	
2675		90°	7,00	1,931	2,009	8,770	1,866	1,727	1,878	1,815	0,253	0,266	0,170	0,194
2676		45°	7,00	2,037	2,026	8,860	1,846	1,835	1,865	1,873	0,266		0,200	
2677		45°	7,00	2,013	2,011	8,940	1,812	1,829	1,861	1,859	0,277		0,195	
2678		45°	7,00	2,027	2,008	8,870	1,851	1,821	1,867	1,837	0,267		0,197	
2679		45°	7,00	2,002	2,014	8,780	1,839	1,860	1,832	1,848	0,254		0,185	
2924	spawana 0,6 (10^3 s^{-1})	90°	7,01	1,982	2,029	8,060	1,928	1,864	1,909	1,925	0,150	0,155	0,107	0,109
2925		90°	6,99	1,992	2,030	8,040	1,947	1,877	1,918	1,912	0,150		0,105	
2926		90°	7,01	1,994	2,040	8,160	1,928	1,877	1,922	1,911	0,164		0,116	
3330		90°	6,99	1,986	1,999	7,850	1,860	1,872	1,986	1,928	0,123	0,096	0,086	0,082
3331		90°	6,97	2,000	2,018	7,510	1,856	1,901	1,998	1,963	0,077		0,083	
3332		90°	6,97	1,998	2,032	7,590	1,844	1,938	2,017	1,969	0,089		0,076	
3333		45°	6,98	2,057	2,028	8,360	1,883	1,911	2,007	1,974	0,198	0,195	0,104	0,102
3334		45°	6,97	2,068	2,018	8,341	1,927	1,990	1,885	1,960	0,197		0,109	
3335		45°	6,98	2,036	2,019	8,310	1,917	1,897	1,976	1,958	0,191		0,095	
3196	spawana 0,3 (10^3 s^{-1})	0°	7,00	1,983	2,026	7,900	1,927	1,836	1,917	1,920	0,129	0,122	0,113	0,119
3197		0°	6,99	1,958	2,039	7,560	1,919	1,918	1,961	1,984	0,082		0,055	
3198		0°	7,00	1,960	2,031	7,610	1,973	1,856	2,015	1,904	0,087		0,062	
3199		0°	7,00	1,964	2,045	7,750	1,921	1,831	1,930	1,840	0,107		0,136	
3200		0°	7,00	1,967	2,028	7,920	1,941	1,869	1,983	1,799	0,131		0,109	
3201		90°	7,02	1,958	2,055	8,570	2,014	1,884	1,941	1,850	0,221	0,118	0,090	0,086
3202		90°	7,00	1,966	2,054	7,860	1,969	1,880	1,985	1,899	0,123		0,081	
3203		90°	7,01	1,976	2,046	7,760	1,981	1,898	1,972	1,873	0,107		0,085	
3204		90°	7,02	1,969	2,053	7,940	2,000	1,910	1,930	1,861	0,131		0,091	
3205		90°	7,01	1,965	2,067	7,780	1,980	1,898	1,972	1,890	0,110		0,085	
3206		45°	7,01	1,991	2,033	8,270	1,973	1,869	1,972	1,880	0,180	0,131	0,095	0,111
3207		45°	7,02	1,980	2,055	7,900	2,015	1,916	1,901	1,837	0,125		0,107	
3208		45°	7,02	1,966	2,054	7,890	1,940	1,815	1,981	1,832	0,124		0,130	
3209		45°	7,01	1,982	2,032	7,850	1,987	1,885	1,839	1,872	0,120		0,121	
3210		45°	7,02	1,980	2,044	7,770	1,838	1,902	2,021	1,903	0,108		0,102	

1000.01	nieszpawana (10^{-3} s^{-1})	0°	6,98	1,931	1,986	8,700	1,789	1,774	1,850	1,815	0,246	0,241	0,174	0,186
1000.02		0°	6,96	1,717	1,982	8,590	1,899	1,643	1,723	1,508	0,234		0,190	
1000.03		0°	6,97	1,830	1,983	8,690	1,738	1,623	1,874	1,746	0,247		0,191	
1000.04		0°	7,00	1,844	2,008	8,630	1,909	1,772	1,758	1,632	0,233		0,185	
1000.05		0°	6,98	1,910	2,009	8,680	1,868	1,757	1,817	1,744	0,244	0,233	0,190	0,159
1000.11		90°	7,02	1,989	2,014	8,590	1,842	1,784	1,888	1,870	0,224		0,175	
1000.14		90°	6,99	1,924	2,003	8,650	1,904	1,817	1,837	1,740	0,237		0,158	
1000.15		90°	6,99	1,703	2,004	8,570	1,923	1,638	1,768	1,468	0,226		0,188	
1000.16		90°	7,00	2,020	1,970	8,670	1,780	1,808	1,904	1,913	0,239	0,251	0,160	0,178
1000.18		90°	7,00	1,980	1,990	8,690	1,862	1,902	1,873	1,895	0,241		0,111	
1000.21	spawana 0,6 (10^{-3} s^{-1})	45°	6,99	1,664	2,005	8,580	1,929	1,593	1,739	1,457	0,227	0,115	0,190	0,073
1000.22		45°	6,98	1,888	2,018	8,910	1,792	1,702	1,893	1,769	0,277		0,191	
1000.23		45°	6,99	1,985	2,013	8,710	1,851	1,865	1,821	1,825	0,246		0,179	
1000.24		45°	6,99	1,945	2,014	8,770	1,806	1,745	1,916	1,866	0,255		0,165	
1000.25		45°	6,98	1,793	2,008	8,710	1,798	1,624	1,904	1,718	0,248	0,091	0,163	0,049
1000.107.S		0°	7,02	1,970	2,000	7,490	1,973	1,962	1,925	1,944	0,067		0,035	
1000.108.S		0°	7,04	1,990	2,010	7,870	1,913	1,899	1,981	1,939	0,118		0,070	
1000.109.S		0°	7,02	1,990	1,980	7,800	1,905	1,822	1,969	1,961	0,111		0,075	
1000.111.S		90°	7,02	1,980	2,020	7,500	1,903	1,938	1,991	1,972	0,068	0,101	0,051	0,058
1000.112.S		90°	7,06	1,990	2,030	7,890	2,031	1,911	1,944	1,963	0,118		0,050	
1000.113.S		90°	7,04	1,990	2,020	7,660	1,904	1,941	2,013	1,974	0,088		0,048	
1000.121.S	spawana 0,3 (10^{-3} s^{-1})	45°	7,05	2,000	2,050	7,720	1,958	1,957	2,004	1,950	0,095		0,059	
1000.122.S		45°	7,02	1,970	2,030	7,770	2,000	1,932	1,967	1,887	0,107	0,082	0,056	0,079
1000.123.S		45°	7,05	1,980	1,980	7,790	1,942	1,938	2,011	1,950	0,105		0,060	
1000.271.S		0°	7,00	1,970	2,040	7,430	1,984	1,916	2,016	1,909	0,061		0,051	
1000.272.S		0°	7,05	1,990	2,030	7,610	1,955	1,920	1,937	1,898	0,079	0,076	0,087	0,057
1000.273.S		0°	7,03	2,010	2,060	7,600	1,996	1,929	1,948	1,882	0,081		0,102	
1000.274.S		0°	7,06	1,960	2,050	7,810	1,982	1,912	1,911	1,919	0,106		0,078	
1000.281.S		90°	7,00	1,990	2,050	7,540	2,024	1,958	1,935	1,946	0,077		0,056	
1000.282.S		90°	6,99	1,980	2,030	7,470	1,903	1,959	1,965	1,955	0,069	0,092	0,062	0,070
1000.283.S		90°	7,01	1,930	2,010	7,490	1,935	1,885	1,995	1,866	0,068		0,053	
1000.284.S	nieszpawana (1 s^{-1})	90°	6,99	1,950	2,040	7,630	1,988	1,905	1,968	1,897	0,092		0,058	
1000.300.S		45°	6,99	1,967	2,028	7,590	1,890	1,861	2,014	1,930	0,086	0,210	0,078	0,113
1000.301.S		45°	7,00	1,982	2,047	7,720	2,015	1,920	1,986	1,864	0,103		0,072	
1000.302.S		45°	7,00	2,001	2,032	7,610	2,019	1,937	1,986	1,892	0,087		0,060	
1000.08		0°	7,00	2,068	2,054	8,440	1,952	1,890	1,948	1,915	0,206	0,192	0,145	0,111
1000.09		0°	6,98	2,065	2,042	8,330	1,961	1,847	1,957	1,932	0,193		0,139	
1000.10		0°	6,98	2,058	2,056	8,480	1,934	1,832	1,962	1,945	0,215		0,150	
1000.11		0°	6,98	2,020	1,970	8,570	1,844	1,922	1,870	1,930	0,228		0,113	
1000.30		90°	6,98	2,132	2,042	8,280	1,981	1,951	1,965	1,955	0,186	0,212	0,130	0,115
1000.31		90°	6,99	2,049	2,054	8,110	1,915	1,918	1,984	1,973	0,160		0,109	
1000.32		90°	6,99	2,129	2,043	8,210	1,976	1,946	1,906	2,060	0,175		0,119	
1000.33		90°	6,98	2,138	2,061	8,230	1,978	1,995	1,985	1,973	0,179		0,121	
1000.34	nieszpawana (1 s^{-1})	90°	6,97	2,040	1,980	8,560	1,852	1,978	1,888	1,972	0,228	0,212	0,094	0,115
1000.35		90°	6,98	2,050	1,990	8,530	1,845	1,964	1,930	1,988	0,222		0,094	
1000.40		45°	6,98	2,102	2,088	8,250	1,961	1,982	1,979	1,968	0,182		0,128	
1000.41		45°	6,99	2,130	2,059	8,600	2,010	2,011	1,950	1,962	0,230		0,115	
1000.42		45°	7,00	2,112	2,064	8,260	1,964	1,945	2,038	2,000	0,180		0,104	
1000.43		45°	7,01	2,020	2,000	8,680	1,816	1,940	1,889	1,947	0,238		0,122	
1000.44	nieszpawana (1 s^{-1})	45°	6,98	2,010	2,020	8,580	1,906	1,961	1,869	1,934	0,229		0,104	

1000.310.S	spawana 0,6 (1 s ⁻¹)	0°	7,00	2,041	2,038	7,640	1,918	1,961	2,028	1,969	0,091	0,083	0,073	0,073
1000.311.S		0°	6,98	2,036	2,019	7,600	1,930	1,964	1,960	1,958	0,089		0,078	
1000.312.S		0°	7,00	2,035	2,025	7,480	1,907	1,970	2,001	1,979	0,069		0,068	
1000.313.S		90°	7,00	1,981	2,027	7,590	1,938	1,899	1,982	1,976	0,084	0,066	0,057	0,039
1000.314.S		90°	7,02	1,992	2,033	7,350	1,997	1,990	2,000	1,977	0,047		0,022	
1000.316.S		45°	6,98	1,995	2,028	7,570	1,965	1,934	2,018	1,927	0,085	0,077	0,052	0,061
1000.317.S		45°	6,98	1,987	2,058	7,470	1,931	1,945	2,024	1,924	0,070		0,069	
1000.320.S	spawana 0,3 (1 s ⁻¹)	0°	7,00	1,961	2,044	7,670	1,900	1,982	1,968	1,873	0,096	0,086	0,076	0,076
1000.321.S		0°	7,01	1,957	2,033	7,460	1,961	1,898	1,913	1,922	0,064		0,075	
1000.322.S		0°	7,01	1,987	2,025	7,700	1,970	1,918	1,963	1,884	0,098		0,076	
1000.323.S		90°	6,99	1,957	2,050	7,710	2,002	1,910	1,997	1,896	0,103	0,085	0,054	0,055
1000.324.S		90°	7,01	1,961	2,042	7,740	1,986	1,910	1,980	1,903	0,104		0,059	
1000.325.S		90°	7,01	1,974	2,045	7,350	2,009	1,920	2,009	1,905	0,049		0,051	
1000.326.S		45°	7,00	1,962	2,056	7,380	2,003	1,924	1,973	1,869	0,054	0,071	0,070	0,061
1000.327.S		45°	7,01	1,985	2,055	7,550	1,931	1,914	2,033	1,982	0,077		0,056	
1000.328.S		45°	7,01	1,967	2,030	7,590	2,018	1,936	1,949	1,873	0,083		0,057	

Docol 1200M														
Numer próbki	Rodzaj próbki	Kąt orientacji próbki	L_0 – dł. pomiarowa próbki przed zerwaniem (mm) b – szerokość próbki przed zerwaniem (mm) h – grubość próbki przed zerwaniem (mm) L_u – dł. pomiarowa próbki po zerwaniu (mm) b_1, b_2 – szerokości szyjek próbki po zerwaniu (mm) h_1, h_2 – grubości szyjek próbki po zerwaniu (mm)								ϵ_c – wydłużenie całkowite(–) $\bar{\epsilon}_c$ – średnie wydłużenie całkowite (–) ϵ_r – wydłużenie równomierne(–) $\bar{\epsilon}_r$ – średnie wydłużenie równomierne (–)			
			L_0	b	h	L_u	b_1	h_1	b_2	h_2	ϵ_c	$\bar{\epsilon}_c$	ϵ_r	$\bar{\epsilon}_r$
2609	nieśpawana (10^3 s^{-1})	0°	6,99	1,978	2,047	8,490	1,860	1,823	1,909	1,834	0,215	0,213	0,175	0,17
2610		0°	7,00	1,984	2,028	8,510	1,941	1,818	1,899	1,728	0,216		0,182	
2611		0°	7,00	2,004	2,024	8,510	1,881	1,858	1,892	1,881	0,216		0,150	
2612		0°	7,00	1,924	2,025	8,470	1,843	1,766	1,890	1,803	0,210		0,170	
2613		0°	7,00	1,953	2,025	8,460	1,906	1,820	1,890	1,770	0,209		0,161	
2614		90°	7,00	2,000	2,032	8,320	1,865	1,798	1,952	1,917	0,189	0,198	0,146	0,14
2615		90°	7,00	2,008	2,036	8,390	1,898	1,858	1,888	1,877	0,199		0,156	
2616		90°	7,00	1,985	2,030	8,260	1,926	1,836	1,912	1,869	0,180		0,134	
2617		90°	7,00	2,007	2,033	8,580	1,917	1,854	1,921	1,882	0,226		0,138	
2618		90°	7,00	1,950	2,038	8,380	1,885	1,819	1,929	1,863	0,197		0,132	
2619		45°	7,00	2,008	2,032	8,580	1,865	1,851	1,871	1,913	0,226	0,226	0,161	0,15
2620		45°	7,00	1,991	2,025	8,400	1,881	1,806	1,935	1,898	0,200		0,141	
2621		45°	7,00	1,975	2,024	8,510	1,856	1,735	1,927	1,900	0,216		0,162	
2622		45°	7,00	1,949	2,025	8,910	1,851	1,741	1,941	1,844	0,273		0,160	
2623		45°	7,00	1,961	2,027	8,520	1,861	1,782	1,910	1,892	0,217		0,147	
2949	spawana 0,6 (10^3 s^{-1})	0°	7,00	1,976	2,044	7,810	1,891	1,866	1,914	1,859	0,116	0,139	0,140	0,13
2950		0°	7,02	1,975	2,064	8,040	1,897	1,880	1,869	1,893	0,145		0,148	
2951		0°	7,01	1,977	2,029	8,260	1,869	1,867	1,950	1,908	0,178		0,113	
2952		0°	7,01	1,993	2,034	7,550	1,960	1,922	2,039	1,926	0,117		0,054	
2953		0°	7,00	1,972	2,043	7,810	1,928	1,892	1,913	1,892	0,116		0,109	
2970		90°	7,01	1,979	2,025	8,180	2,002	1,939	1,979	1,890	0,167	0,137	0,052	0,07
2971		90°	7,01	1,972	2,030	8,080	1,970	1,905	2,011	1,950	0,153		0,043	
2972		90°	7,02	1,989	2,043	7,980	2,009	1,950	1,971	1,913	0,137		0,057	
2973		90°	7,00	1,981	2,029	7,780	2,019	1,948	1,977	1,836	0,111		0,063	
2974		90°	7,02	1,980	2,043	7,840	2,017	1,965	1,949	1,917	0,117		0,051	
2975		45°	7,00	1,999	2,027	7,570	1,945	1,839	1,970	1,911	0,081	0,124	0,104	0,08
2976		45°	7,03	1,988	2,024	7,860	1,973	1,921	1,843	1,900	0,118		0,104	
2977		45°	7,02	1,977	2,027	8,100	2,001	1,923	1,959	1,904	0,154		0,058	
2978		45°	7,02	1,993	2,003	7,790	1,968	1,908	1,955	1,883	0,110		0,074	
2979		45°	7,03	1,978	2,034	8,130	1,956	1,927	1,959	1,946	0,156		0,061	
2954	spawana 0,3 (10^3 s^{-1})	0°	7,00	1,986	2,042	7,650	1,969	1,918	1,944	1,885	0,093	0,140	0,090	0,13
2955		0°	7,00	1,982	2,079	8,028	1,941	1,857	1,821	1,923	0,147		0,160	
2956		0°	7,00	1,988	2,052	7,807	1,908	1,933	1,882	1,907	0,115		0,121	
2957		0°	7,00	1,995	2,081	8,095	1,912	1,942	1,920	1,957	0,156		0,111	
2958		0°	7,01	1,982	2,035	7,997	1,847	1,933	1,882	1,931	0,141		0,120	
3116		90°	6,99	2,066	2,077	7,680	1,989	1,937	1,952	1,926	0,099	0,107	0,127	0,10
3117		90°	7,00	1,999	2,032	7,610	1,972	1,935	1,990	1,948	0,087		0,056	
3118		90°	7,00	2,025	2,070	8,490	1,966	1,925	1,970	1,976	0,213		0,092	
3119		90°	7,02	2,041	2,050	8,060	1,995	1,907	1,927	1,892	0,148		0,123	
3120		90°	7,01	2,037	2,046	7,660	1,974	1,925	1,980	1,950	0,093		0,088	
3121		45°	7,02	2,019	2,083	8,530	1,969	1,890	1,990	1,876	0,215	0,151	0,128	0,12
3122		45°	7,01	2,002	2,076	8,250	1,928	1,870	2,053	1,962	0,177		0,089	
3123		45°	7,00	2,080	2,072	7,910	1,975	1,891	1,972	1,924	0,130		0,145	
3124		45°	7,00	2,041	2,092	7,890	1,989	1,901	1,965	1,888	0,127		0,140	
3125		45°	7,01	2,022	2,067	7,740	1,992	1,878	2,062	1,963	0,104		0,073	

2965	wyrzewaną (10^3 s^{-1})	0°	7,02	1,992	2,093	7,933	1,924	1,959	1,888	1,973	0,130	0,139	0,113	0,14
2966		0°	7,01	2,040	2,068	8,078	1,963	1,845	1,945	1,963	0,152		0,134	
2967		0°	7,01	2,040	2,037	8,026	1,894	1,859	1,913	1,908	0,145		0,159	
2968		0°	7,01	2,032	2,092	7,917	1,999	1,993	1,855	1,816	0,129		0,156	
2969		0°	7,01	2,022	2,042	7,993	1,934	1,889	1,871	1,862	0,140		0,157	
3131	wyrzewaną (10^3 s^{-1})	90°	7,00	2,039	2,077	7,700	2,017	1,943	1,982	1,963	0,100	0,115	0,085	0,09
3132		90°	7,00	1,996	2,063	7,900	1,989	1,942	1,959	1,937	0,129		0,076	
3188		90°	7,00	2,052	2,061	7,760	1,988	1,911	2,005	1,944	0,109		0,099	
3189		90°	7,01	2,028	2,030	7,870	1,990	1,916	1,974	1,866	0,123		0,098	
2959	podgrzewaną (10^3 s^{-1})	0°	7,02	1,968	2,001	7,877	1,858	1,949	1,874	1,816	0,122	0,157	0,121	0,15
2960		0°	7,01	1,977	2,045	8,269	1,865	1,959	1,799	1,701	0,180		0,204	
2961		0°	7,00	1,977	2,032	8,178	1,861	1,968	1,869	1,890	0,168		0,117	
2962		0°	7,02	1,988	2,058	8,192	1,850	1,851	1,854	1,900	0,167		0,178	
2964		0°	7,01	1,980	2,032	8,055	1,837	1,878	1,893	1,874	0,149		0,150	
3126		90°	7,00	1,990	2,022	8,070	1,909	1,911	2,021	1,947	0,153	0,137	0,061	0,11
3127		90°	7,00	1,980	2,030	8,090	1,897	1,909	2,001	1,939	0,156		0,072	
3128		90°	7,00	2,003	2,048	8,010	1,814	1,893	1,911	1,935	0,144		0,150	
3129		90°	6,99	1,970	2,043	7,910	1,911	1,916	2,001	1,945	0,132		0,066	
3130		90°	6,99	1,993	2,066	7,680	1,828	1,895	2,005	1,941	0,099		0,120	
1200.01	niespawaną (10^{-3} s^{-1})	0°	6,99	1,988	2,031	8,536	1,910	1,861	1,938	1,891	0,221	0,220	0,119	0,13
1200.02		0°	6,98	2,007	2,034	8,576	1,930	1,929	1,951	1,901	0,229		0,099	
1200.03		0°	6,99	1,917	2,029	8,407	1,965	1,801	1,760	1,912	0,203		0,127	
1200.04		0°	6,99	2,028	2,035	8,552	1,951	1,913	1,898	1,889	0,223		0,128	
1200.05		0°	6,99	1,988	2,031	8,540	1,812	1,908	1,947	1,905	0,222		0,127	
1200.06		90°	7,00	2,034	2,030	8,392	1,966	1,963	1,959	2,024	0,199	0,206	0,055	0,09
1200.07		90°	6,99	2,036	2,032	8,459	1,910	1,962	1,950	1,960	0,210		0,093	
1200.08		90°	6,99	2,015	2,028	8,390	1,910	1,900	1,969	1,980	0,200		0,086	
1200.09		90°	6,99	2,033	2,032	8,451	1,964	1,951	1,953	1,940	0,209		0,084	
1200.10		90°	6,98	2,028	2,031	8,451	1,878	1,961	1,976	1,972	0,211		0,087	
1200.11		45°	6,98	1,979	2,038	8,483	1,946	1,871	1,919	1,879	0,215	0,221	0,113	0,09
1200.12		45°	6,99	2,029	2,030	8,536	1,999	2,011	1,936	1,990	0,221		0,046	
1200.13		45°	6,99	2,014	2,030	8,549	1,950	1,811	1,926	1,780	0,231		0,175	
1200.14		45°	6,98	2,006	2,033	8,451	1,878	1,943	1,954	1,907	0,197		0,106	
1200.15		45°	6,98	1,995	2,036	8,563	1,927	1,847	1,965	1,913	0,227		0,110	
1200.101.S	spawana 0,6 (10^{-3} s^{-1})	0°	7,00	2,000	2,020	7,585	1,829	1,930	2,016	1,969	0,083	0,089	0,077	0,07
1200.102.S		0°	7,02	1,980	2,020	8,490	1,986	1,941	1,773	1,936	0,209		0,098	
1200.103.S		0°	7,01	2,020	2,010	7,520	2,011	1,953	1,887	1,920	0,073		0,075	
1200.104.S		0°	7,02	2,000	2,020	7,540	1,999	1,957	1,981	1,955	0,074		0,038	
1200.105.S		0°	7,01	1,980	2,000	7,240	1,966	1,986	1,973	1,940	0,033		0,024	
1200.106.S		0°	7,01	1,960	2,016	7,440	2,006	1,941	1,968	1,950	0,061	0,109	0,022	0,060
1200.111.S		90°	7,03	1,990	2,010	7,640	1,988	1,948	1,888	1,925	0,087		0,066	
1200.112.S		90°	7,04	2,000	2,010	7,820	1,990	1,869	2,005	1,938	0,111		0,057	
1200.113.S		90°	7,02	1,990	2,020	7,930	1,959	1,899	2,015	1,933	0,130		0,056	
1200.130.S		45°	7,01	2,010	2,030	7,440	2,006	1,914	1,962	1,915	0,061	0,073	0,074	0,06
1200.131.S		45°	7,02	2,000	2,030	7,680	2,015	1,945	2,004	1,922	0,094		0,045	
1200.132.S		45°	6,99	2,000	2,000	7,430	1,947	1,890	1,999	1,912	0,063		0,066	

1200.300.S	spawana 0,3 (10 ⁻³ s ⁻¹)	0°	7,00	2,001	2,045	7,650	1,954	1,921	1,996	1,928	0,093	0,093	0,077	0,09
1200.301.S		0°	6,98	2,006	2,038	7,620	2,002	1,945	1,869	1,903	0,092		0,097	
1200.313.S		90°	6,99	2,066	2,033	7,54	1,955	1,98	1,992	2,022	0,079	0,083	0,064	0,07
1200.314.S		90°	6,98	2,055	2,025	7,59	1,915	1,988	2,009	1,971	0,087		0,072	
1200.306.S		45°	6,99	2,023	2,024	7,760	1,972	1,901	1,991	1,943	0,110	0,102	0,075	0,07
1200.307.S		45°	7,00	2,013	2,055	7,660	1,986	1,942	1,994	1,974	0,094		0,062	
1200.310.S	wygrzewana (10 ⁻³ s ⁻¹)	0°	6,99	2,057	2,042	7,990	1,962	1,954	1,904	1,976	0,143	0,115	0,106	0,10
1200.311.S		0°	6,98	2,047	2,027	7,590	1,943	1,922	1,968	1,932	0,087		0,101	
1200.313.S		90°	6,99	2,066	2,033	7,520	1,963	1,945	1,975	2,031	0,076	0,080	0,073	0,07
1200.314.S		90°	6,98	2,055	2,025	7,570	1,930	1,959	2,004	1,985	0,085		0,073	
1200.320.S	podgrzewana (10 ⁻³ s ⁻¹)	0°	6,98	1,983	2,040	8,260	1,884	1,835	1,997	1,946	0,183	0,154	0,102	0,11
1200.321.S		0°	6,99	1,990	2,025	7,780	1,952	1,953	1,867	1,880	0,113		0,101	
1200.322.S		0°	6,99	1,989	2,023	8,150	1,883	1,850	2,001	1,796	0,166		0,137	
1200.323.S		90°	6,98	1,991	2,045	7,720	2,003	1,950	1,873	1,920	0,106	0,100	0,085	
1200.324.S		90°	6,99	2,013	1,991	7,650	1,854	1,826	2,025	1,978	0,094		0,085	
1200.160	niespawana (1 s ⁻¹)	0°	6,95	2,050	2,030	8,110	1,897	1,880	1,985	1,997	0,167	0,204	0,105	0,10
1200.161		0°	6,97	2,040	2,030	8,650	1,933	1,941	1,940	1,935	0,241		0,103	
1200.165		90°	6,95	2,060	2,030	8,290	1,935	1,980	1,937	1,958	0,193	0,189	0,097	0,09
1200.140		90°	7,02	2,005	2,029	8,320	1,950	1,846	1,976	1,953	0,185		0,091	
1200.166		45°	6,97	2,080	2,030	8,380	1,953	1,966	1,949	1,985	0,202	0,202	0,096	0,08
1200.167		45°	6,98	2,040	2,020	8,410	1,955	1,970	1,945	1,988	0,205		0,068	
1200.150.S	spawana 0,6 (1 s ⁻¹)	0°	7,02	2,000	2,020	7,800	1,924	1,914	1,964	1,930	0,111	0,115	0,081	0,08
1200.151.S		0°	7,02	2,010	2,020	7,860	2,007	1,955	1,884	1,888	0,120		0,086	
1200.152.S		0°	7,02	2,000	2,030	7,810	1,959	1,836	2,012	1,934	0,113		0,084	
1200.333.S		90°	6,98	1,984	2,035	7,820	1,995	1,939	1,999	1,906	0,117	0,118	0,052	0,05
1200.334.S		90°	6,99	1,981	2,037	7,840	1,987	1,951	1,975	1,938	0,119		0,048	
1200.336.S		45°	7,00	2,008	2,039	7,790	1,935	1,939	1,990	1,926	0,113	0,113	0,080	0,08
1200.337.S		45°	7,01	2,002	2,035	7,810	1,998	1,971	1,889	1,920	0,114		0,077	
1200.340.S	spawana 0,3 (1 s ⁻¹)	0°	7,00	1,979	2,052	7,780	1,949	1,920	1,975	1,920	0,111	0,104	0,078	0,10
1200.341.S		0°	7,01	1,994	2,043	7,790	1,929	1,848	1,979	1,884	0,111		0,117	
1200.342.S		0°	7,01	1,978	2,038	7,640	1,925	1,905	1,918	1,915	0,090		0,098	
1200.343.S		90°	6,98	2,037	2,046	7,660	1,912	1,922	2,006	1,972	0,097	0,103	0,092	0,09
1200.344.S		90°	6,96	2,029	2,062	7,720	1,942	1,899	1,992	1,982	0,109		0,096	
1200.346.S		45°	6,98	2,018	2,071	7,790	1,963	1,907	2,000	1,976	0,116	0,106	0,086	0,09
1200.347.S		45°	6,98	1,988	2,043	7,800	1,976	1,933	1,919	1,811	0,117		0,114	
1200.348.S		45°	6,98	1,990	2,059	7,580	1,982	1,939	1,981	1,932	0,086		0,068	
1200.350.S		0°	6,98	2,032	2,063	7,750	1,956	1,905	1,917	1,948	0,110	0,110	0,124	0,09
1200.351.S		0°	6,97	2,029	2,060	7,790	1,999	1,990	1,974	1,960	0,118		0,065	
1200.352.S		0°	6,98	1,998	2,056	7,690	1,986	1,972	1,972	1,892	0,102		0,074	
1200.353.S	wygrzewana (1 s ⁻¹)	90°	6,97	1,998	2,057	7,650	1,961	1,940	2,019	1,960	0,098	0,090	0,059	0,06
1200.354.S		90°	6,96	1,999	2,061	7,780	1,954	1,938	1,999	1,992	0,118		0,061	
1200.355.S		90°	6,97	2,005	2,032	7,340	1,943	1,973	2,003	1,955	0,053		0,051	
1200.360.S	odgrzewana (1 s ⁻¹)	0°	6,99	1,972	2,016	7,790	1,902	1,884	1,901	1,940	0,114	0,156	0,093	0,10
1200.361.S		0°	7,00	1,976	2,020	8,390	2,010	1,938	1,895	1,894	0,199		0,067	
1200.362.S		0°	6,99	1,974	2,031	8,080	1,883	1,868	1,939	1,893	0,156		0,116	
1200.363.S		90°	6,98	1,972	2,042	7,960	1,828	1,890	1,967	1,981	0,140	0,144	0,096	0,09
1200.364.S		90°	6,97	1,973	2,058	8,006	1,864	1,892	1,992	1,946	0,149		0,097	
1200.365.S		90°	6,97	2,001	1,963	7,970	1,842	1,881	1,894	1,968	0,143		0,092	

Docol 1500M														
Numer próbki	Rodzaj próbki	Kąt orientacji próbki	L_0 – dł. pomiarowa próbki przed zerwaniem (mm) b – szerokość próbki przed zerwaniem (mm) h – grubość próbki przed zerwaniem (mm) L_u – dł. pomiarowa próbki po zerwaniu (mm) b_1, b_2 – szerokości szyjek próbki po zerwaniu (mm) h_1, h_2 – grubości szyjek próbki po zerwaniu (mm)								ϵ_c – wydłużenie całkowite(–) $\bar{\epsilon}_c$ – średnie wydłużenie całkowite (–) ϵ_r – wydłużenie równomierne(–) $\bar{\epsilon}_r$ – średnie wydłużenie równomierne (–)			
			L_0	b	h	L_u	b_1	h_1	b_2	h_2	ϵ_c	$\bar{\epsilon}_c$	ϵ_r	$\bar{\epsilon}_r$
2716	niespawana (10^3 s^{-1})	0°	6,98	1,998	2,011	8,340	1,945	1,920	1,853	1,787	0,195	0,187	0,141	0,135
2717		0°	6,99	1,955	2,011	8,260	1,945	1,880	1,856	1,772	0,182		0,132	
2718		0°	6,98	1,996	2,013	8,360	1,922	1,888	1,900	1,839	0,198		0,128	
2719		0°	7,00	1,932	2,019	8,230	1,951	1,863	1,852	1,742	0,176		0,137	
2720		0°	6,99	1,988	2,018	8,290	1,911	1,898	1,875	1,826	0,186		0,138	
2721		90°	7,00	1,992	2,021	8,110	1,910	1,878	1,946	1,914	0,159	0,168	0,101	0,106
2722		90°	6,99	1,948	2,028	8,170	1,949	1,885	1,916	1,873	0,169		0,088	
2723		90°	7,00	1,986	2,024	8,160	1,919	1,855	1,913	1,894	0,166		0,119	
2724		90°	7,00	1,961	2,025	8,140	1,943	1,864	1,941	1,834	0,163		0,106	
2725		90°	6,99	1,972	2,024	8,290	1,929	1,828	1,933	1,882	0,186		0,114	
2726		45°	7,00	1,934	2,031	8,330	1,896	1,794	1,970	1,838	0,190	0,183	0,119	0,117
2727		45°	7,00	1,982	2,031	8,240	1,758	1,875	1,988	1,942	0,177		0,125	
2728		45°	7,00	1,972	2,036	8,290	1,939	1,864	1,924	1,870	0,184		0,113	
2729		45°	7,00	1,948	2,038	8,280	1,954	1,863	1,917	1,820	0,183		0,114	
2730		45°	7,00	1,963	2,033	8,250	1,938	1,842	1,935	1,858	0,179		0,114	
3319	spawana 0,6 (10^3 s^{-1})	0°	6,95	2,137	2,034	7,630	1,953	2,014	1,921	2,006	0,098	0,094	0,116	0,089
3320		0°	6,95	2,123	2,062	7,640	1,969	2,056	1,921	2,055	0,099		0,095	
3321		0°	6,97	2,123	2,028	7,690	1,991	2,021	2,001	2,016	0,103		0,069	
3322		0°	6,98	2,134	2,030	7,610	1,943	2,015	1,964	2,028	0,090		0,097	
3323		0°	6,95	2,136	2,031	7,500	1,992	2,021	1,980	2,051	0,079		0,073	
2821		90°	7,00	2,011	2,010	7,690	1,906	1,912	2,022	1,956	0,099	0,096	0,064	0,047
2822		90°	7,01	1,987	1,936	7,670	1,916	1,936	1,929	1,952	0,094		0,029	
2823		90°	7,01	1,998	1,622	7,690	1,906	1,912	2,022	1,956	0,930		0,058	
2824		90°	6,99	1,989	1,615	7,480	1,988	2,001	1,985	2,064	0,098		0,040	
3324		45°	6,97	2,135	2,028	7,570	1,941	1,921	1,959	1,936	0,076	0,083	0,073	0,082
3325		45°	6,97	2,116	2,050	7,480	1,988	2,001	1,985	2,064	0,073		0,074	
3326		45°	6,97	2,140	2,033	7,580	1,991	2,088	1,996	2,016	0,088		0,064	
3327		45°	6,98	2,137	2,029	7,480	1,963	2,004	2,005	2,005	0,072		0,090	
3329		45°	6,97	2,139	2,035	7,670	1,965	1,978	1,984	2,033	0,100		0,099	
3304	spawana 0,3 (10^3 s^{-1})	0°	7,01	1,996	2,040	7,690	1,981	1,907	1,965	1,932	0,097	0,084	0,075	0,072
3305		0°	6,99	1,993	2,092	7,640	2,090	1,952	2,055	1,923	0,093		0,038	
3306		0°	6,99	1,997	2,044	7,510	1,930	1,915	2,013	1,913	0,074		0,082	
3307		0°	6,98	1,991	2,068	7,490	1,994	1,920	1,998	1,926	0,073		0,073	
3308		0°	7,00	2,001	2,048	7,570	1,941	1,921	1,959	1,936	0,081		0,090	
3309		90°	7,04	1,993	2,030	8,350	1,993	1,943	1,960	1,962	0,186	0,099	0,048	0,055
3310		90°	7,00	1,986	2,032	7,520	1,990	1,953	2,012	1,951	0,074		0,033	
3311		90°	6,98	1,993	2,033	7,740	1,968	1,933	1,992	1,922	0,109		0,062	
3312		90°	7,01	1,989	2,036	7,830	1,960	1,946	1,992	1,926	0,117		0,059	
3313		90°	6,99	1,995	2,033	7,650	1,970	1,903	1,973	1,936	0,094		0,072	
3314		45°	7,00	1,991	2,038	7,640	2,009	1,935	2,000	1,940	0,091	0,122	0,045	0,067
3315		45°	6,99	1,990	2,034	7,690	1,964	1,931	1,958	1,934	0,100		0,068	
3316		45°	7,01	1,985	2,038	7,690	1,955	1,891	1,989	1,950	0,097		0,068	
3317		45°	7,01	1,983	2,033	7,910	1,908	1,986	1,943	1,890	0,128		0,081	
3318		45°	7,02	1,990	2,038	8,360	1,971	1,941	1,968	1,903	0,191		0,071	

3349	wyrzutowa (10^3 s^{-1})	0°	7,00	1,987	2,031	7,470	1,951	1,948	1,985	1,869	0,067	0,073	0,075	0,067
3350		0°	6,91	1,980	2,015	7,430	1,985	1,940	1,985	1,869	0,075		0,068	
3351		0°	6,99	1,979	2,024	7,310	1,996	1,858	1,992	1,919	0,046		0,064	
3352		0°	6,97	1,986	2,029	7,090	2,009	1,898	1,990	1,963	0,017		0,044	
3353		0°	6,98	1,983	2,027	7,600	1,910	1,958	1,885	1,943	0,089		0,086	
3354	wyrzutowa (10^3 s^{-1})	90°	6,96	1,983	1,953	7,240	1,905	1,959	1,910	1,941	0,040	0,068	0,041	0,051
3355		90°	6,96	1,981	1,956	7,690	1,981	1,958	1,843	1,939	0,105		0,040	
3356		90°	6,98	1,981	1,948	7,440	1,908	1,952	1,912	1,921	0,066		0,043	
3357		90°	6,97	1,989	1,959	7,340	1,911	1,948	1,950	1,928	0,053		0,042	
3358		90°	6,98	1,998	2,023	7,550	1,914	1,946	1,900	1,947	0,082		0,089	
3359	podgrzewana (10^3 s^{-1})	0°	7,03	1,955	2,035	7,960	1,984	1,861	1,981	1,842	0,132	0,115	0,084	0,086
3360		0°	7,02	1,965	2,031	7,780	1,989	1,923	1,912	1,890	0,108		0,073	
3361		0°	7,00	1,950	2,035	7,900	1,835	1,853	1,926	1,880	0,129		0,130	
3362		0°	7,00	1,970	2,031	7,470	1,963	1,896	1,958	1,939	0,067		0,064	
3363		0°	7,01	1,970	2,021	7,980	1,865	1,910	2,019	1,900	0,138		0,076	
3364	podgrzewana (10^3 s^{-1})	90°	7,01	1,993	1,949	7,670	1,980	1,897	1,879	1,893	0,094	0,074	0,062	0,066
3365		90°	7,01	1,963	1,948	7,440	1,893	1,914	1,868	1,889	0,061		0,069	
3366		90°	7,00	1,970	1,992	7,510	1,894	1,914	1,938	1,916	0,073		0,070	
3367		90°	7,00	1,980	1,945	7,500	1,896	1,902	1,910	1,932	0,071		0,056	
3368		90°	7,00	1,960	1,996	7,480	1,913	1,909	1,890	1,917	0,069		0,076	
1500.01	niespawana (10^{-3} s^{-1})	0°	6,99	1,985	1,997	8,360	1,924	1,881	1,899	1,889	0,196	0,184	0,100	0,100
1500.02		0°	6,99	1,785	1,997	8,220	1,952	1,739	1,862	1,654	0,176		0,101	
1500.03		0°	7,02	1,955	2,001	8,280	1,884	1,853	1,934	1,884	0,179		0,097	
1500.04		0°	7,01	1,905	2,000	8,310	1,955	1,849	1,895	1,745	0,185		0,101	
1500.11		90°	7,01	1,930	2,021	8,230	1,956	1,849	1,951	1,870	0,174	0,175	0,074	0,076
1500.12	niespawana (10^{-3} s^{-1})	90°	7,01	1,965	2,027	8,210	1,957	1,887	1,936	1,910	0,171		0,078	
1500.13		90°	7,02	1,982	2,027	8,250	1,922	1,880	1,979	1,946	0,175		0,076	
1500.14		90°	7,01	1,890	2,023	8,260	1,992	1,856	1,914	1,785	0,178		0,075	
1500.21		45°	7,01	1,988	2,034	8,330	1,990	1,829	1,985	1,926	0,188	0,187	0,084	0,088
1500.22	niespawana (10^{-3} s^{-1})	45°	7,01	1,902	2,036	8,290	1,991	1,867	1,899	1,754	0,183		0,099	
1500.23		45°	7,00	1,938	2,042	8,260	1,980	1,889	1,909	1,847	0,180		0,089	
1500.24		45°	7,00	1,967	2,038	8,390	1,971	1,918	1,955	1,869	0,199		0,078	
1500.110.S		0°	7,04	2,000	2,020	7,530	1,942	1,993	2,048	1,953	0,070	0,076	0,027	0,057
1500.111.S	spawana 0,5 (10^{-3} s^{-1})	0°	7,02	2,010	2,030	7,800	1,961	1,941	1,879	1,848	0,111		0,121	
1500.112.S		0°	7,04	1,980	2,000	7,370	1,993	1,963	2,004	1,913	0,047		0,022	
1500.101.S		90°	7,00	1,980	2,030	7,150	1,919	1,983	2,028	1,963	0,021		0,032	
1500.102.S		90°	7,00	1,990	1,960	7,330	1,995	1,963	1,907	1,939	0,047	0,030	0,025	0,025
1500.104.S	spawana 0,5 (10^{-3} s^{-1})	90°	7,00	1,990	1,960	7,190	1,999	2,000	1,904	1,969	0,027		0,007	
1500.105.S		90°	7,05	2,000	2,010	7,190	1,995	1,968	1,982	1,948	0,020		0,032	
1500.106.S		90°	7,04	2,000	1,960	7,300	1,999	1,958	1,895	1,956	0,037		0,029	
1500.120.S		45°	7,03	2,000	1,990	7,350	1,992	2,001	1,993	1,925	0,046	0,060	0,018	0,026
1500.121.S	spawana 0,3 (10^{-3} s^{-1})	45°	7,05	1,990	2,010	7,640	2,020	1,966	2,005	1,938	0,084		0,018	
1500.122.S		45°	7,03	2,000	2,040	7,390	1,997	1,931	2,008	1,977	0,051		0,043	
1500.141.S		0°	7,05	1,990	2,020	7,371	2,005	1,921	1,981	1,951	0,046	0,047	0,042	0,039
1500.142.S		0°	7,06	1,990	2,040	7,320	2,036	1,955	2,019	1,910	0,037		0,036	
1500.143.S		0°	7,06	2,000	2,040	7,470	2,012	1,965	2,010	1,936	0,058		0,040	
1500.300.S	spawana 0,3 (10^{-3} s^{-1})	90°	7,00	2,011	2,023	7,270	1,999	1,956	2,009	1,981	0,039	0,037	0,031	0,031
1500.301.S		90°	7,00	2,001	2,018	7,250	2,010	1,955	2,000	1,952	0,036		0,031	
1500.131.S		45°	7,05	2,000	2,030	7,260	2,029	1,978	2,016	1,989	0,030		0,012	
1500.132.S		45°	7,05	2,000	2,030	7,150	2,021	1,956	2,022	1,970	0,014	0,035	0,023	0,017
1500.133.S		45°	7,05	1,990	2,020	7,470	2,017	1,973	2,004	1,961	0,060		0,016	

1500.144.S	wygrzewana (10 ⁻³ s ⁻¹)	0°	7,05	2,000	2,010	7,390	1,985	1,944	2,003	1,962	0,048	0,044	0,032	0,038
1500.145.S		0°	7,05	1,990	2,020	7,540	1,985	1,970	1,910	1,984	0,070		0,044	
1500.146.S		0°	7,05	1,990	2,020	7,390	2,014	1,975	2,016	1,910	0,048		0,027	
1500.147.S		0°	7,05	1,990	2,020	7,120	2,014	1,966	1,988	1,958	0,010		0,024	
1500.310.S	90°	6,99	2,011	1,969	7,580	1,910	1,973	1,976	1,960	0,084	0,082	0,036	0,038	
1500.311.S		7,00	2,014	1,996	7,560	1,914	1,960	1,981	2,011	0,080		0,039		
1500.151.S	podgrzewana(10 ⁻³ s ⁻¹)	0°	7,02	1,990	2,000	7,680	1,895	1,918	1,903	1,899	0,094	0,079	0,098	0,067
1500.152.S		0°	7,04	1,980	1,990	7,170	1,911	1,921	1,918	1,940	0,018		0,066	
1500.153.S		0°	7,04	1,980	1,980	7,600	1,941	1,945	1,918	1,936	0,080		0,047	
1500.154.S		0°	7,02	1,980	1,980	7,460	1,925	1,939	1,913	1,931	0,063		0,056	
1500.161.S	90°	7,03	1,960	2,010	7,190	2,003	1,882	1,998	1,911	0,023	0,057	0,030	0,055	
1500.162.S		7,02	1,990	2,030	7,660	2,001	1,913	1,990	1,928	0,091		0,054		
1500.163.S		7,03	1,990	2,050	7,430	1,991	1,929	1,965	1,918	0,057		0,072		
1500.170	nieśpawana (1 s ⁻¹)	0°	6,99	2,040	2,020	8,280	1,981	1,943	1,926	1,872	0,185	0,180	0,106	0,102
1500.171		0°	7,00	2,020	2,000	8,220	1,910	1,898	1,946	1,914	0,174		9,935	
1500.174		90°	7,01	2,020	2,030	8,090	1,971	1,934	1,943	1,890	0,131	0,154	0,087	0,096
1500.175		90°	7,01	1,965	2,027	8,210	1,957	1,887	1,936	1,910	0,171		0,105	
1500.178		45°	7,00	2,040	2,040	8,140	1,980	1,960	1,942	1,891	0,160	0,163	0,980	0,102
1500.179		45°	7,01	1,965	2,027	8,210	1,957	1,887	1,936	1,910	0,166		0,104	
1500.320.S	spawana 0,6 (1 s ⁻¹)	0°	6,92	2,080	2,010	7,440	1,954	1,996	1,989	2,001	0,075	0,075	0,061	0,061
1500.321.S		0°	6,92	2,080	1,999	7,560	1,950	1,996	1,951	1,995	0,770		0,062	
1500.322.S		0°	6,99	2,010	2,020	7,510	2,015	2,022	1,986	1,998	0,074		0,590	
1500.323.S		90°	6,98	1,985	1,954	7,540	1,986	1,984	1,882	1,930	0,080	0,064	0,024	0,034
1500.324.S		90°	6,99	1,979	1,961	7,510	1,935	1,957	1,979	1,955	0,074		0,014	
1500.325.S		90°	6,98	1,995	2,012	7,410	2,010	1,962	1,866	1,935	0,062		0,063	
1500.326.S		45°	6,92	2,113	2,020	7,270	2,020	1,998	2,002	2,021	0,051	0,048	0,056	0,042
1500.327.S		45°	6,92	2,080	2,010	7,230	2,003	2,012	1,981	2,003	0,045		0,045	
1500.328.S		45°	6,91	2,100	2,020	7,240	2,008	2,077	1,990	1,995	0,048		0,042	
1500.330.S	spawana 0,3 (1 s ⁻¹)	0°	6,98	1,984	2,028	7,470	2,005	1,905	1,995	1,963	0,070	0,058	0,040	0,034
1500.331.S		0°	6,99	1,995	2,028	7,320	2,011	1,978	1,998	1,926	0,047		0,034	
1500.332.S		0°	6,98	1,991	2,039	7,380	2,011	1,955	2,024	1,958	0,057		0,028	
1500.333.S		90°	7,02	1,988	2,025	7,420	1,990	1,950	1,978	1,991	0,057	0,052	0,030	0,027
1500.334.S		90°	7,01	1,982	2,029	7,310	2,008	1,942	2,010	1,957	0,043		0,027	
1500.335.S		90°	6,99	1,982	2,020	7,390	1,996	1,954	2,002	1,954	0,057		0,025	
1500.336.S		45°	7,00	1,983	2,030	7,630	1,960	1,958	1,992	1,932	0,090	0,079	0,047	0,028
1500.337.S		45°	6,99	1,979	2,026	7,390	2,009	1,969	2,016	1,951	0,057		0,016	
1500.338.S		45°	6,99	1,982	2,028	7,620	2,028	2,004	1,959	1,946	0,090		0,021	
1500.340.S	wygrzewana (1 s ⁻¹)	0°	6,99	1,996	2,020	7,430	1,953	1,984	1,970	1,935	0,062	0,064	0,052	0,054
1500.341.S		0°	6,98	1,980	2,029	7,490	1,948	1,958	1,969	1,942	0,066		0,056	
1500.343.S		90°	7,00	1,994	1,961	7,360	1,991	1,951	1,913	1,966	0,051	0,046	0,023	0,033
1500.344.S		90°	6,98	1,988	2,018	7,260	1,922	1,969	1,999	1,956	0,040		0,043	
1500.350.S	podgrzewana (1 s ⁻¹)	0°	7,03	1,963	2,028	7,610	1,839	1,853	2,004	1,929	0,083	0,096	0,095	0,090
1500.351.S		0°	6,99	1,966	2,029	7,760	2,025	1,935	1,886	1,820	0,110		0,085	
1500.353.S		90°	7,02	1,999	1,995	7,270	1,933	1,934	1,916	1,931	0,036	0,036	0,072	0,073
1500.354.S		90°	6,99	1,992	2,001	7,240	1,918	1,940	1,918	1,932	0,036		0,073	

Nazwa pliku: Rozprawa doktorska_Paweł_08.01.23 -PP.docx
Katalog: /Users/pawelprochenka/Library/Containers/com.microsoft.Wor
d/Data/Documents
Szablon: /Users/pawelprochenka/Library/Group
Containers/UBF8T346G9.Office/User
Content.localized/Templates.localized/Normal.dotm
Tytuł:
Temat:
Autor: Prochenka Paweł
Słowa kluczowe:
Komentarze:
Data utworzenia: 5.01.2023 10:07:00
Numer edycji: 108
Ostatnio zapisany: 9.01.2023 04:32:00
Ostatnio zapisany przez: Paweł Prochenka
Całkowity czas edycji: 910 minut
Ostatnio drukowany: 9.01.2023 04:35:00
Po ostatnim całkowitym wydruku
Liczba stron: 223
Liczba wyrazów: 100 095 (około)
Liczba znaków: 600 575 (około)