

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. Tadeusza Kościuszki
WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA
DYSCYPLINA: MECHANIKA

**WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA PŁASKICH
ELEMENTÓW KONSTRUKCJI Z OTWORAMI,
WZMACNIANYCH NAKŁADKAMI KOMPOZYTOWYMI**

**FATIGUE STRENGTH OF FLAT CONSTRUCTION
ELEMENTS WITH HOLES REINFORCED BY COMPOSITE
OVERLAYS**

mgr inż. Mateusz Wygoda

promotor: dr hab. inż. Bogdan Szybiński, prof. PK
promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Romanowicz

KRAKÓW 2023

*Składam serdeczne podziękowania
dla Pana dr. hab. inż. Bogdana Szybińskiego prof. PK
za życzliwość i cenne wsparcie we wszystkich
momentach realizacji rozprawy doktorskiej.*

*Podziękować chcę także
Panu dr. inż. Pawłowi Romanowiczowi
za nieocenione wsparcie merytoryczne, cierpliwość
i uwagi dotyczące realizacji rozprawy doktorskiej.*

*Specjalne podziękowania kieruję mojej rodzinie,
rodzicom za zrozumienie sytuacji w jakiej powstawała ta rozprawa,
żonie Weronice za każdą chwilę wsparcia i zrozumienia mojej pracy,
a przede wszystkim córce Gabrieli, która ze względu na swój
wiek nie zadawała pytań.*

*Dziękuję firmie S&P Polska Sp. z o.o. za bezpłatne przekazanie
kleju S&P Resin 220 oraz taśmy S&P C-Laminate 150/2000
na potrzeby realizacji badań niniejszej rozprawy doktorskiej.*

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
1. Wprowadzenie	9
1.1. Wstęp do tematyki pracy.....	9
1.2. Przegląd literatury.....	13
1.3. Cel pracy	18
1.4. Zakres pracy	19
2. Materiały i metody badawcze	21
2.1. Materiały badawcze.....	21
2.1.1. Stalowe elementy konstrukcyjne	21
2.1.2. Kleje strukturalne.....	22
2.1.3. Wzmocnienia kompozytowe	24
2.1.4. Geometria i zestawienie próbek do badań.....	25
2.2. Metody i narzędzia badawcze	27
2.2.1. Stanowisko badawcze MTS Landmark 370.10	27
2.2.2. Technika Cyfrowej Korelacji Obrazu (<i>DIC</i>).....	29
2.2.3. Metoda Elementów Skończonych (<i>MES</i>)	31
3. Zmęczeniowa trwałość połączeń klejowych.....	33
3.1. Połączenia klejowe, sposoby realizacji i formy zniszczenia	33
3.2. Teoretyczny model połączenia typu <i>DLJ</i>	36
3.3. Numeryczny model połączenia typu <i>DLJ</i>	38
3.4. Analiza doraźnej wytrzymałości złącza typu <i>DLJ</i>	39
3.5. Rozkład naprężeń połączenia klejowego <i>DLJ</i>	43
3.6. Trwałość zmęczeniowa połączenia <i>DLJ</i>	45
4. Wpływ wzmocnienia na trwałość elementów konstrukcji z otworami	51
4.1. Wpływ wzmocnienia kompozytowego na trwałość oraz na charakter zmian obciążenia elementu konstrukcyjnego	51
4.2. Numeryczna weryfikacja wpływu kształtu nakładki na spiętrzenie naprężeń	59
4.3. Skuteczność wzmocnienia nakładkami kompozytowymi przy wybranych poziomach obciążenia	71
4.4. Wpływ rodzaju i kształtu wzmocnienia na trwałość zmęczeniową	74

5.	Wpływ rodzaju spoiwa na trwałość zmęczeniową.....	78
5.1.	Skuteczność wybranych typów klejów strukturalnych na trwałość zmęczeniową	78
5.2.	Analiza grubości warstw klejów strukturalnych	90
5.3.	Numeryczny model <i>MES</i> badanej próbki ze wzmocnieniem typu +B	106
5.4.	Dyskusja otrzymanych wyników badań zmęczeniowych i numerycznych...	108
6.	Podsumowanie i wnioski końcowe	115
6.1.	Podsumowanie i dyskusja wyników.....	115
6.2.	Wnioski.....	117
6.3.	Kierunki i perspektywy dalszych prac	118
	Literatura	121
	Streszczenia.....	127
	Zestawienie rysunków	128
	Zestawienie tabel	132

Wykaz ważniejszych oznaczeń

<i>CFRP</i>	– kompozyt wzmocniony włóknem węglowym,
<i>GFRP</i>	– kompozyt wzmocniony włóknem szklanym,
<i>DIC</i>	– technika cyfrowej korelacji obrazu (z ang. <i>DIC</i> – Digital Image Correlation),
<i>MES</i>	– metoda elementów skończonych (z ang. <i>FEM</i> – Finite Element Method),
<i>DLJ</i>	– złącze typu double-lap joint (<i>DLJ</i> – tj. z podwójną zakładką),
+A	– wzmocnienie typu A o kształcie kwadratowej nakładki,
+B	– wzmocnienie typu B o kształcie prostokątnych pasów,
<i>S355J2+N(P1)</i>	– pierwsza partia materiału/stali S355J2+N,
<i>S355J2+N(P1)</i>	– druga partia materiału/stali S355J2+N,
<i>HEX-TVR380</i>	– laminat wykonany techniką autoklawową z materiału HEXCEL TVR 380 M12/26%/R-glass/epoxy – włókna jednokierunkowe,
<i>ROV-EP601</i>	– tkanina z włókien szklanych [0°/90°] na osnowie żywicy epoksydowej epidian 601 – wykonana metodą ręcznego laminowania i worka próżniowego,
<i>SP150/2000</i>	– jednokierunkowa taśma z włókna węglowego S&P C-Laminate 150/2000 wyprodukowana w procesie pultruzji,
<i>SP220</i>	– spoiwo klejowe S&P Resin Epoxy 220,
<i>DP6310</i>	– spoiwo klejowe 3M Scotch-Weld DP 6310 NS,
<i>HY4080</i>	– spoiwo klejowe Henkel Loctite® Hy 4080 GY,
A	– powierzchnia obciążonego przekroju,
A_0, A_1, A_2	– stałe teoretycznego rozwiązania dla <i>DLJ</i> ,
A_{adh}	– pole powierzchni kleju,
b	– szerokość próbki typu <i>DLJ</i> ,
C_1, C_2	– w równaniach odpowiednio sztywność rdzenia i nakładki próbek typu <i>DLJ</i> ,
E	– moduł Younga,
F	– przyłożona siła rozciągająca,
F_{Ye}	– obciążenie odpowiadające granicy plastyczności materiału,
F_{max}	– maksymalna przyłożona wartość siły rozciągającej przy obciążeniu cyklicznym,
f_u	– wytrzymałość na rozciąganie,
ν	– współczynnik Poissona,
G_0	– moduł Kirchoffa (ściananie),
g_0	– grubość kleju dla próbek typu <i>DLJ</i> ,
g_1	– grubość rdzenia dla próbek typu <i>DLJ</i> ,
g_2	– grubość nakładki dla próbek typu <i>DLJ</i> ,
i	– numer próbki,
K_t	– współczynnik kształtu dla płyty o skończonej szerokości,
K_σ	– naprężeniowy współczynnik kształtu dla płyty o skończonej szerokości
K_ϵ	– odkształceniowy współczynnik kształtu dla płyty o skończonej szerokości,
K_t^∞	– współczynnik koncentracji naprężeń dla płyty o nieskończonej szerokości,
L	– długość złącza klejowego <i>DLJ</i> ,
L_{sp}	– odległość pomiędzy łązonymi elementami (rdzeniami) <i>DLJ</i> ,
N_1, N_2	– odpowiednio siły działające w rdzeniu i w nakładkach na przekroju poprzecznym,
N_f	– liczba przepracowanych cykli do momentu zniszczenia próbki,
N_f^{base}	– próbka bez wzmocnienia - liczba przepracowanych cykli do momentu zniszczenia,
N_f^i	– próbka wzmocniona - liczba przepracowanych cykli do momentu zniszczenia,
S_{N_f}	– odchylenie standardowe dla przepracowanej liczby cykli,
δ_{inc}^i	– przyrost trwałości,
R	– współczynnik obciążenia,
u_x	– wydłużenie próbki w kierunku rozciągania,

Y_e	– granica plastyczności,
Y_{eH}	– górna granica plastyczności,
ε_1	– odkształcenia główne,
ε_u	– odkształcenie przy zerwaniu,
ε_{TOT}	– całkowite odkształcenie próbki w kierunku rozciągania,
ε_x	– odkształcenie główne w kierunku rozciągania,
$\varepsilon_{x,over,cent}$	– odkształcenie w środkowym przekroju zakładki,
$\varepsilon_{x,local,max}$	– odkształcenie lokalne z pomiaru <i>DIC</i> ,
v	– prędkość rozciągania,
δ_{inc}^i	– wzrost trwałości zmęczeniowej elementu wzmocnionego w stosunku do elementu bez wzmocnienia,
θ	– orientacja włókien warstw kompozytu z uwzględnieniem usytuowania względem siły obciążającej element,
σ_{peel}	– naprężenie odrywające w warstwie kleju (peel stress),
$\sigma_{peel,max}$	– maksymalne naprężenie odrywające w warstwie kleju (peel stress),
σ_{max}	– najwyższa wartość naprężenia w karbie,
$\sigma_{max,FAT}$	– najwyższa wartość naprężenia (rozciągającego) działającego na przekrój elementu z otworem w trakcie zadawania obciążeń cyklicznych,
$\sigma_{m,FAT}$	– naprężenie średnie (rozciągające) w trakcie zadawania obciążeń cyklicznych,
$\sigma_{min,FAT}$	– najniższa wartość naprężenia (rozciągającego) działającego na przekrój elementu z otworem w trakcie zadawania obciążeń cyklicznych,
τ	– naprężenie ścinające w warstwie kleju,
τ_{adh}	– wytrzymałość kleju na ścinanie,
τ_{avg}	– uśredniona wartość naprężenia ścinającego w kleju,
$\tau_{max,FAT}$	– najwyższa wartość naprężenia ścinającego działającego na ścinaną powierzchnię kleju w trakcie zadawania obciążeń cyklicznych,
$\tau_{m,FAT}$	– naprężenie średnie (ścinające) w trakcie zadawania obciążeń cyklicznych,
$\tau_{min,FAT}$	– najniższa wartość naprężenia ścinającego działającego na ścinaną powierzchnię kleju w trakcie zadawania obciążeń cyklicznych,
γ	– odkształcenie ścinające,
ρ	– gęstość,
$\kappa, \kappa_1, \kappa_2$	– sztywność elementu, odpowiednio: κ_1 – rdzenia, κ_2 – nakładki,
κ_i	– sztywność elementu dla <i>i</i> -tego cyklu zmęczeniowego,
κ_i/κ_0	– znormalizowany współczynnik sztywności elementu,
R	– współczynnik asymetrii cyklu,
R_{ov}	– promień nakładki wzmacniającej,
R^2	– miara dopasowania linii trendu do uzyskanych danych,
W	– szerokość stalowej płyty,
t	– grubość stalowego elementu,
t_{ov}	– grubość nakładki wzmacniającej,
t_{adh}	– grubość warstwy kleju dla wzmocnień elementów z karbem,
\bar{t}_{adh}	– średnia grubość warstwy kleju dla serii pomiarów dla wybranej próbki,
$\bar{\bar{t}}_{adh}$	– średnia grubość warstwy kleju dla zestawu próbek wykonanych z jednego rodzaju spoiwa.

OBJAŚNIENIE OZNACZEŃ PRÓBEK

RDZEŃ	–	SPOIWO	–	WZMOCNIENIE	+	RODZAJ
↓		↓		↓		↓
<i>S355J2+N(P1)</i>		<i>HEX-TVR380</i>		<i>SP220</i>		+A
<i>S355J2+N(P2)</i>		<i>ROV-EP601</i>		<i>DP6310</i>		+B
		<i>SP150/2000</i>		<i>HY4080</i>		

1. Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale omówiono ogólną problematykę poruszanego tematu rozprawy doktorskiej, przegląd dotychczasowych prac badawczych, sformułowano cele i zakres badań. Dodatkowo omówiono wpływ i działanie karbu dla wybranych przypadków.

1.1. Wstęp do tematyki pracy

Zagadnienia związane z wytrzymałością elementów konstrukcyjnych zazwyczaj wiążą się z długim czasem ich eksploatacji. W budowie i eksploatacji maszyn powszechnie stosuje się podzespoły i elementy konstrukcyjne o złożonych kształtach poddane działaniu obciążeń o charakterze zmiennym (zmęczeniowym). Wśród nich można wyodrębnić grupę elementów z różnego rodzaju podcięciami i otworami. Zastosowanie podcięć i otworów w konstrukcjach uzasadnione jest względami technologicznymi (sposób wykonania np.: frezowanie, cięcie laserem lub wodą), eksploatacyjnymi (np.: montaż i demontaż) oraz konstrukcyjnymi (np. wszelkiego rodzaju otwory rewizyjne lub służące do prowadzenia przewodów zasilających i sterujących, itp.). Zgodnie z ogólnie dostępną wiedzą w zakresie mechaniki każda raptowna zmiana kształtu geometrycznego (podcięcie, wycięty otwór, gwałtowna zmiana krzywizny kształtu) jest określana mianem karbu (karbu geometrycznego) w otoczeniu którego obserwuje się zaburzenie nominalnego stanu naprężenia wraz z lokalnym wzrostem naprężeń maksymalnych na brzegu podcięcia, otworu, itp. Zjawisko to określa się mianem spiętrzenia (koncentracji) naprężeń. Podstawowym miernikiem wpływu karbu w elemencie konstrukcyjnym jest współczynnik kształtu (K_t) określony wzorami jako współczynnik naprężeniowy (1.1a), lub współczynnik odkształceniowy (1.1b) [1–7]:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (1.1a)$$

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{nom}} \quad (1.1b)$$

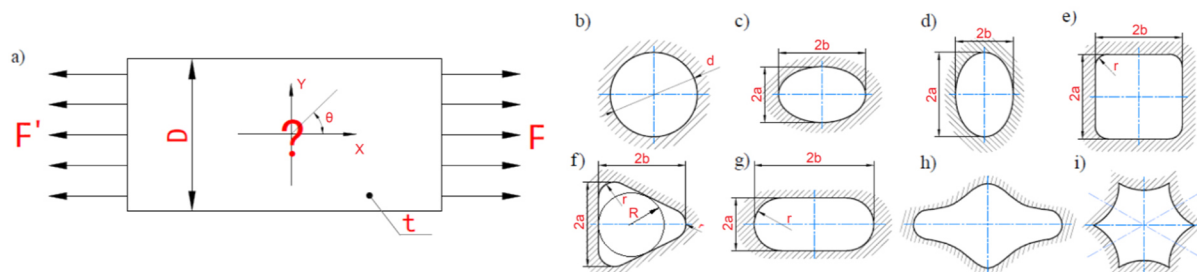
gdzie: σ_{nom} to iloraz siły rozciągającej i przekroju obliczonego w miejscu otworu elementu.

Współczynnik ten określony jest jako stosunek maksymalnych wartości naprężeń lub odkształceń w karbie do naprężeń lub odkształceń nominalnych wyznaczonych z uwzględnieniem osłabienia przekroju. Wyżej podana formuła znajduje zastosowanie w zakresie odkształceń sprężystych. W zależności od kształtu i rodzaju karbu wartość naprężeń maksymalnych może kilkakrotnie przekraczać wartości nominalne naprężeń wyznaczone w pewnym oddaleniu od karbu [1]. Badania spiętrzenia naprężeń wokół wybranych rodzajów karbów prowadzone są od wielu lat, a jedne z pierwszych prac podających rozwiązania konstrukcji z karbami to prace Kirscha A. (1898) [8] oraz Inglisa C.E. (1913) [9], gdzie autorzy podają rozwiązania analityczne dla rozciąganych płyt z otworami kołowymi i eliptycznymi. W kolejnych latach prowadzone były liczne rozważania teoretyczne - spośród najistotniejszych prac dotyczących matematycznego modelowania karbów należy wymienić prace: Kolosova G.V. (1910) [10], Muschelishvilego N.I. (1935) [11], Neubera H. (1937) [12], Savina

G.N. (1968) [13] dla izotropowych elementów z korbami oraz Lekhnickiego S.G. (1957) [14] dla elementów anizotropowych. Równolegle przeprowadzano intensywne badania doświadczalne korbów. Szczególną rolę odgrywały tu badania wykonywane metodą elastooptyczną. Metoda ta wykorzystuje zjawisko dwójłomności wymuszonej, występujące w przezroczystych (pierwotnie izotropowych) obiektach, które po obciążeniu i prześwietleniu światłem spolaryzowanym powodują ponowną polaryzację światła w płaszczyznach określonych przez kierunki głównych naprężeń występujące w badanym obiekcie. Intensywne badania w tym zakresie prowadzono od lat 30-tych XX wieku, a za klasyczną w dziedzinie elastooptyki można uznać monografię Frochta M.M. [15] z 1948 roku. Wyniki doświadczalnych badań koncentracji naprężeń zgromadzono w licznych monografiach i tablicach inżynierskich. Jako przykład można tu przytoczyć pionierską monografię Petersona R.E. „*Stress Concentration Design Factors*” [16] z 1953 roku wraz z jej kolejnymi wznowieniami [2]. Warto dodać, że zamieszczony w monografii [2] rozdział poświęcony spiętrzeniu naprężeń wokół różnorodnych otworów wykonanych w elementach konstrukcji o różnym kształcie zawiera ponad 100 diagramów różnych kombinacji kształtów otworów w elementach konstrukcyjnych oraz różnorodnych obciążeń i odwołuje się do wyników z ponad 150 prac teoretycznych i doświadczalnych opracowywanych od lat 30-tych ubiegłego stulecia. Z innych monografii dotyczących problematyki korbów można zacytować prace [17,18]. Innym sposobem weryfikacji doświadczalnej spiętrzenia naprężeń w rzeczywistych obiektach było wykorzystanie pomiarów tensometrycznych. Przełomowym momentem w modelowaniu i obliczeniach korbów w konstrukcjach należy uznać wprowadzenie Metody Elementów Skończonych (*MES*). Metoda ta pozwala na stosunkowo dokładne modelowanie spiętrzenia naprężeń w elementach konstrukcji. Wśród zyskujących ostatnio szczególną popularność metod badawczych nie sposób pominąć metody Cyfrowej Korelacji Obrazu (*Digital Image Correlation, DIC*), która pozwala na efektywny i bezkontaktowy pomiar deformacji badanych obiektów [19,20].

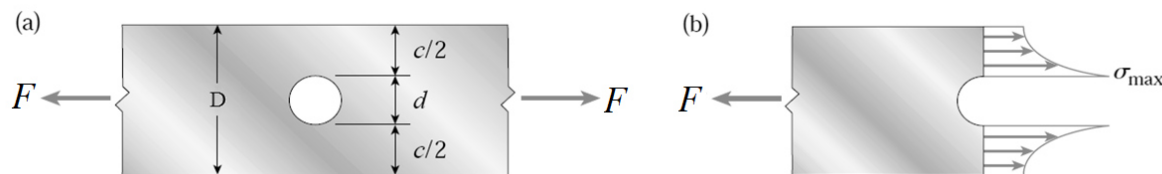
Podane wyżej metody analityczne, doświadczalne oraz numeryczne pozwalają na określenie spiętrzenia naprężeń w karbie i jego bezpośrednim otoczeniu oraz kontrolę otrzymywanych rozwiązań. Dzięki opracowanym rozwiązaniom z powodzeniem można projektować skomplikowane konstrukcje zawierające różnego rodzaju karby. Szczególnym przypadkiem świadomego wprowadzenia korbów do konstrukcji jest zastosowanie tzw. otworów o charakterze odciążającym. Wówczas konstruktor świadomie wprowadza do konstrukcji otwory np. w celu zmniejszenia masy konstrukcji lub też obniżenia spiętrzenia naprężeń. W takim wypadku często obok oceny wyężenia konstrukcji należy przeprowadzić analizę sztywności, a w elementach cienkościennych poddanych działaniu obciążeń ściskających wyeliminować możliwość pojawienia się wyboczenia ścianek. Jeśli wskutek wprowadzenia do elementu konstrukcji wielu korbów obserwuje się obniżenie spiętrzenia naprężeń w porównaniu do działania pojedynczego karbu, to taki układ korbów określa się mianem układu korbów szeregowych. Odwrotny efekt obserwuje się w przypadku tzw. równoległego układu korbów, gdzie rejestruje się wielokrotnienie efektu działania karbu [2,21].

Zgodnie z wynikami rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych współczynnik kształtu (K_t) zależy od kształtu karbu, jego usytuowania względem brzegu elementu, innych cech geometrycznych oraz rodzaju obciążenia elementu. Na **rys. 1.1.** przedstawiono przykładowe karby w postaci otworów wykonane w rozciągającym płaskim elemencie:



Rysunek 1.1. a) Rozciągany płaski element konstrukcyjny z umiejscowionym karbem na środku płyty pod kątem θ , b) otwór kołowy, c) elipsa pozioma d) elipsa pionowa, e) otwór kwadratowy lub prostokątny, f) otwór trójkątny, g) otwór owalny, h) otwór „prawie” eliptyczny opisany równaniem, i) otwór o kształcie specjalnym opisany równaniem [13,14].

Poprzez szczegółową analizę poszczególnych przypadków możliwe jest dokładne określenie rozkładu naprężeń wokół otworów. Przykładowo na **rys. 1.2.** pokazano rozkład naprężeń w izotropowej rozciąganej płaskiej płycie osłabionej karbem w formie otworu kołowego.



Rysunek 1.2. Izotropowa płyta z otworem kołowym: a) z charakterystycznymi wymiarami służącymi do określenia K_t poprzez dostępny uproszczony opis matematyczny (1.1), b) rozkład naprężeń na krawędzi karbu [22].

W modelowaniu konstrukcji z karbami należy zwrócić uwagę na dobór odpowiedniego modelu obliczeniowego do rozważanej sytuacji (tarcza, płyta, powłoka, bryła). Proponowane w pracy doktorskiej rozważania dotyczyć będą przede wszystkim tarcz i płyt, przy czym jako płytę traktować się będzie element konstrukcyjny, w którym grubość jest co najmniej pięciokrotnie mniejsza niż minimalny wymiar w rzucie. Zależność tą opisano poniżej według [23] zgodnie z normą PN-EN 1992-1-1:2008/NA:2010:

$$\frac{W_{min}}{t} > 5 \quad (1.2)$$

gdzie: W_{min} – najmniejsza rozpiętość płyty, t – wysokość przekroju poprzecznego (grubość).

W literaturze dopuszcza się również inne zależności wymiarowe niż podane we wzorze (1.2) [23,24,25].

Dla przedstawionych na **rys. 1.1.** karbów można podać ściśle rozwiązania pozwalające obliczyć współczynniki spiętrzenia naprężeń [13,14]. W przypadku otworu kołowego w elemencie izotropowym (**rys. 1.1.b, rys. 1.2.**) można podać wartość współczynnika spiętrzenia naprężeń z uwzględnieniem skończonej szerokości płyty [26]:

$$K_t = 3,00 - 3,13 \left(\frac{d}{D}\right) + 3,66 \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 1,53 \left(\frac{d}{D}\right)^3 \quad (1.3)$$

W przypadku płaskiej płytki z wyciętym otworem eliptycznym (**rys. 1.1.c-d**) wartość współczynnika kształtu (K_t) oblicza się następująco (skończona szerokość płytki) [26].

$$K_t = C1 + C2 \left(\frac{2a}{D}\right) + C3 \left(\frac{2a}{D}\right)^2 + C4 \left(\frac{2a}{D}\right)^3 \quad (1.4)$$

gdzie: $0,5 \leq \frac{a}{b} \leq 10$.

Z kolei stałe $C1-C4$ zależą od proporcji wymiarowych półosi elipsy [26]:

$$C1 = 1,000 + 0,000 \sqrt{\frac{a}{b}} + 2,000 \frac{a}{b} \quad (1.5); \quad C2 = -0,351 - 0,021 \sqrt{\frac{a}{b}} - 2,483 \frac{a}{b} \quad (1.6);$$

$$C3 = 3,621 - 5,183 \sqrt{\frac{a}{b}} + 4,494 \frac{a}{b} \quad (1.7); \quad C4 = -2,270 + 5,204 \sqrt{\frac{a}{b}} - 4,011 \frac{a}{b} \quad (1.8);$$

W przypadku rozciąganych izotropowych płyt z karbami o innych kształtach geometrycznych (**rys. 1.1.d-i**) w literaturze dostępne są rozwiązania ściśle dla płyt o nieskończonej szerokości, a dostępne wykresy podają zależność współczynnika spiętrzenia naprężeń od promienia zaokrąglenia naroża, proporcji wymiarowych między bokami otworu, kąta orientacji karbu, a także zadanej grubości panelu.

W przypadku współczynnika kształtu (K_t) dla otworu kwadratowego/prostokątnego (**rys. 1.1.e**) usytuowanego pod kątem $\theta=0^\circ$ w płycie o nieskończonej szerokości uproszczony zapis jest następujący [26]:

$$K_t^\infty = C1 + C2 \left(\frac{b}{a}\right) + C3 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + C4 \left(\frac{b}{a}\right)^3 \quad (1.9)$$

gdzie: $0,2 \leq \frac{r}{b} \leq 1$ oraz $0,3 \leq \frac{b}{a} \leq 1,0$

$$C1 = 14,815 - 15,774 \sqrt{\frac{r}{b}} + 8,149 \frac{r}{b} \quad (1.10); \quad C2 = -11,201 - 9,750 \sqrt{\frac{r}{b}} + 9,600 \frac{r}{b} \quad (1.11);$$

$$C3 = 0,202 + 38,622 \sqrt{\frac{r}{b}} - 27,374 \frac{r}{b} \quad (1.12); \quad C4 = 3,232 - 23,002 \sqrt{\frac{r}{b}} + 15,482 \frac{r}{b} \quad (1.13);$$

Istnieje szereg prac, w których wprowadzono dodatkowo współczynnik korekcji dla K_t z uwagi na skończoną szerokość badanego elementu. Jako przykład można tu podać pracę Tana S.C. [27].

W przypadku zastosowania materiału ortotropowego, z uwagi na zwiększoną liczbę stałych materiałowych, stosuje się inne podejście do rozwiązywania zagadnienia dotyczącego określenia współczynnika kształtu (K_t). W przypadku otworu kołowego w płycie o nieskończonej szerokości do wyznaczenia współczynnika kształtu należy wówczas skorzystać z następującej zależności [28]:

$$K_t^\infty = 1 + \sqrt{2\left(\sqrt{E_y/E_x - \nu_{yx}} + E_y/G_{xy}\right)} \quad (1.14)$$

gdzie: $E_y, E_x, \nu_{yx}, G_{xy}$ są modułami dotyczącymi badanego laminatu

Wykorzystując równanie (1.14) można w stosunkowo łatwy sposób określić koncentrację naprężeń wokół otworu eliptycznego [27,28,29]:

$$K_t = 1 + \frac{b}{a} \sqrt{2\left(\sqrt{\frac{E_x}{E_y} - \nu_{xy}} + \frac{E_x}{2G_{xy}}\right)} \quad (1.15)$$

gdzie: a i b są półosiąmi elipsy a kąt $\theta = 0^\circ$

Inne rozwiązania dotyczące karbów o bardziej skomplikowanych kształtach obciążonych w zaprezentowany sposób (**rys. 1.1.**) można znaleźć w pracach [13,14]. Z kolei w formie uproszczonej dostępne są m.in. w pracach: [2,22,26,30]. W przypadku inżynierskich obliczeń konstrukcji z karbami stosunkowo łatwo jest posługiwać się wykresami podanymi w pracy [2].

Zdefiniowany w (1.1) współczynnik kształtu (K_t) pozwala na określenie maksymalnego naprężenia w wybranych przypadkach karbów i rodzajów obciążeń badanych próbek. W elementach obciążonych w sposób cykliczny na wytrzymałość mają wpływ również inne czynniki (wielkość przedmiotu, wrażliwość na działanie karbu, stan powierzchni) i do opisu spiętrzenia naprężeń wykorzystuje się zmęczeniowy współczynnik spiętrzenia naprężeń (β) określony wzorem [31]:

$$\beta = \beta_k \cdot \beta_p \quad (1.16)$$

gdzie: β_k – współczynnik działania karbu, β_p – współczynnik stanu powierzchni.

lub wzorem [31]:

$$\beta = \beta_k + \beta_p - 1 \quad (1.17)$$

Pierwsza zależność (1.16) stosowana jest, gdy współczynnik wyraża wpływ różnych zabiegów technologicznych ulepszenia własności warstwy wierzchniej przedmiotu, zaś drugą zależność (1.17) stosuje się gdy wyraża wpływ obróbki skrawaniem.

1.2. Przegląd literatury

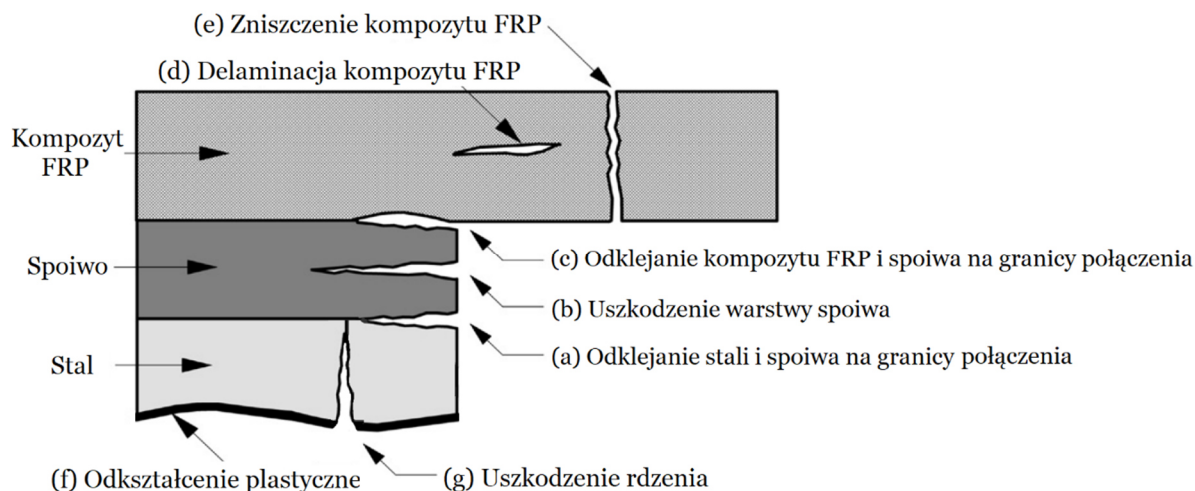
Duża liczba obiektów infrastruktury technicznej jak maszyny, konstrukcje morskie, lotnicze, samochodowe, sprzęt górniczy czy elementy mostów wykonana jest ze stopów metali. Ze względu na złożoną budowę występują w nich obszary z raptowną zmianą kształtu lub przekroju nośnego (otwory, podcięcia, itd.), w których obserwuje się spiętrzenie naprężeń. Obszary te są potencjalnym miejscem w którym pojawiają się uszkodzenia w formie pęknięć. Szczególne niebezpieczeństwo pojawia się w przypadku działania obciążeń zmiennych lub dynamicznych. Ryzyko przyspieszonego uszkodzenia lub zniszczenia elementów konstrukcji z karbami gwałtownie wzrasta w przypadku występowania czynników środowiskowych (obciążenia termiczne, wilgotność, działanie agresywnych cieczy, promieniowanie

UV). Czynniki te są przede wszystkim źródłem korozji lub starzenia się konstrukcji. Korozja jest tym zjawiskiem, które powoduje dodatkowe osłabienie elementów konstrukcyjnych, co może skutkować przyspieszoną inicjacją i rozwojem pęknięć. Gdy obciążenie zmęczeniowe i korozja są jednocześnie działającymi czynnikami, utrata wytrzymałości i sztywności drastycznie wzrasta powodując przedwczesne uszkodzenia. [32,33]. Opisanym wyżej niekorzystnym zjawiskom próbuje się zapobiegać poprzez miejscowe naprawy uszkodzeń. Wśród tradycyjnych metod można wyróżnić wycięcie i wymianę poszycia [34], wykonanie dodatkowych otworów z wprowadzeniem nakładek wzmacniających i zastosowanie łączników gwintowych, nitowanie lub napawanie/wspawanie blach stalowych w miejscu przewidzianym do wymiany/naprawy [35,36]. Inną możliwością jest zastosowanie stalowych kołnierzy i nakładek wzmacniających, co jest częstym zabiegiem w przypadku otworów występujących w zbiornikach ciśnieniowych [37,38]. Jednakże wymienione techniki posiadają wady, które mogą być źródłem innych form zniszczenia decydujących o trwałości konstrukcji. Zasadnicze wady to zmniejszenie przekroju poprzecznego poprzez wykonane otwory na śruby lub nity, zwiększony ciężar własny konstrukcji, wzrost czasu i kosztów wykonania [39,40], jak również obniżona wytrzymałość zmęczeniowa złączy spawanych w skutek obecności naprężeń spawalniczych [41]. Wymienione wady tradycyjnych technik napraw i regeneracji spowodowały rosnące zapotrzebowanie dla znalezienia innych metod wzmacniania elementów konstrukcji. Jedną z alternatywnych metod są wzmocnienia (nakładki wzmacniające) wykonywane z polimerów wzmacnianych włóknem szklanym (*GFRP*) lub węglowym (*CFRP*). W praktyce zaawansowane kompozyty były stosowane już od II wojny światowej [42], znajdując swoje zastosowanie w przemyśle lotniczym i wojskowym. Ich wysoki stosunek wytrzymałości do masy i odporność na warunki atmosferyczne spowodowały zainteresowanie tymi materiałami, a następnie ich powszechne wykorzystanie do naprawy i renowacji mostów już pod koniec lat siedemdziesiątych [43,44].

W przypadku wzmacniania elementów stalowych częściej wybieranym materiałem wzmocnienia są kompozyty *CFRP* ze względu na ich wysoką wytrzymałość, niską gęstość, oraz podobny lub wyższy moduł Younga (E) niż dla stali. Jest to spowodowane dążeniem do zminimalizowania ciężaru własnego konstrukcji, a jednocześnie zapewnieniem odpowiedniej sztywności wzmocnienia (κ), tak aby zapobiec pękaniu zmęczeniowemu oraz niekontrolowanym wibracjom i ugięciom. Wysoka sztywność kompozytów *CFRP* wiąże się niestety z wysokimi kosztami materiałów w nich stosowanych oraz wysokimi kosztami ich produkcji w porównaniu z kompozytami *GFRP* [45]. Jednakże zastosowanie tego rodzaju kompozytów prowadzi do ograniczenia czasu konserwacji i napraw, a z czasem może stać się bardziej opłacalne poprzez znaczne wydłużenie trwałości konstrukcji [46,47]. W rzeczywistości, niska waga i prosta instalacja *CFRP* kompensuje koszt wytwarzania i mogą one zapewnić ogólne oszczędności na poziomie około 17,5% [39] w porównaniu z tradycyjnymi naprawami elementów metalowych.

W trakcie obciążeń elementów konstrukcji, które są strukturami złożonymi z kilku różnych grup materiałów (stopy metali, kleje, kompozyty) dochodzi do różnych typów

uszkodzeń. Wyszczególniono siedem rodzajów uszkodzeń, a szczegółowe ich postaci zostały przedstawione na **rys. 1.3.** [34,48]. Uszkodzenia tego typu pojawiają się w pobliżu miejsca połączenia klejonego. Rodzaje uszkodzenia zależą w dużej mierze od kilku czynników konfiguracji złącza. Można tu wymienić grubości elementów łączonych, grubość spoiwa, długości połączenia, liczby warstw kompozytu FRP, własności mechanicznych oraz lepkości kleju, granicy plastyczności metalowego rdzenia i przygotowania powierzchni podłoża elementów łączonych.



Rysunek 1.3. Schematyczny rysunek rodzajów uszkodzeń [34,48].

W zakresie projektowanych konstrukcji można wymienić szereg niekorzystnych czynników powodujących spiętrzenie naprężeń. Takimi czynnikami są przede wszystkim nieciągłości kształtu [49], puste przestrzenie, pęknięcia [50], otwory [51,52], pęknięcia wokół otworów kołowych [53,54] lub nacięcia na krawędziach [55] mające wpływ na znaczne zmniejszenia wytrzymałości statycznej [56,57] i zmęczeniowej [58,59,60]. Towarzyszące im zaburzenia rozkładu naprężeń i odształceń skutkują lokalnym spiętrzeniem naprężeń [61], które stwarza zagrożenie i może być źródłem przedwczesnego zniszczenia elementu bądź konstrukcji. Ocena tego zjawiska jest dobrze opisana w wielu pracach, a od początku XX wieku opracowano i zastosowano odpowiednie zasady projektowania dla konstrukcji z wycięciami oraz otworami [62]. W celu zminimalizowania czynników wpływających na trwałość maszyn lub konstrukcji przyjęto dwa ogólne podejścia. Pierwsze podejście polega na przeprojektowaniu konstrukcji lub elementów maszyn w celu zmniejszenia koncentracji naprężeń [57]. Może ono polegać na likwidacji karbu jeśli pozwalają na to warunki konstrukcyjne lub zmianie kształtu karbu na łagodniejszy. Druga technika polega na wprowadzeniu lokalnych wzmocnień [51,52,54], które stosowane są w bliskim sąsiedztwie karbu [2]. Jest to uzasadnione zarówno rozwiązaniami analitycznymi [8], jak i wynikami eksperymentalnymi [62], które potwierdzają, że koncentracja naprężeń wpływa tylko na ograniczoną strefę wokół otworu, podcięcia, rowka czy pęknięcia. Wspomniana technika wzmocniania ma długą tradycję i nadal jest skutecznie stosowana [37,63], aczkolwiek stosowane konwencjonalne metody połączeń sprawiają wiele technologicznych problemów o czym wspomniano powyżej. Dlatego bardziej uniwersalnym rozwiązaniem jest zastosowanie niemetalicznych

nakładek, które są klejone wokół nacięć lub pęknięć. W takim przypadku można wzmacniać i naprawiać nie tylko elementy metalowe, ale również konstrukcje betonowe i kompozytowe. Głównym ograniczeniem w tym wypadku jest przyczepność łączonych powierzchni. Rozwojowi tworzyw sztucznych typu *GFRP* i *CFRP* równorzędnie towarzyszył i postępował rozwój w zakresie technologii łączenia w zakresie technik spajania. Nacisk położony był nie tylko na odpowiednią przyczepność klejonych elementów, ale również na precyzyjne dopasowanie elementów pomiędzy sobą.

W ostatnich latach seria artykułów na temat wzmocnień kompozytowych dotyczyła badań wytrzymałości różnych kombinacji materiałów. Zakres tego rodzaju działań obejmował między innymi:

- zastosowanie wzmocnień przez połączenie stopy aluminium–*CFRP* [52];
- zastosowanie wzmocnień przez połączenie stal–*CFRP* [44,64–74];
- zastosowanie wzmocnień kompozyt na osnowie polimerowej–*CFRP* [75,76];
- belki betonowe wzmacniane nakładkami *CFRP* [77];
- spawane połączenie belka–słup ze wzmocnieniem *CFRP* [78];
- wzmocnienia rur i rurociągów [79-82].

Wnioski i obserwacje z badań tego typu połączeń wskazują, że dzięki zastosowaniu wzmocnienia możliwe jest uzyskanie podwyższonej trwałości zmęczeniowej mocno obciążonych elementów konstrukcji z lokalnymi spiętrzeniami naprężeń. Należy jednak mieć świadomość istnienia szeregu problemów i zagadnień technicznych, które muszą zostać odpowiednio zidentyfikowane i rozwiązane tak, aby element został optymalnie wzmocniony.

Kluczowym zaleceniem przy projektowaniu połączeń klejonych jest takie ukształtowanie złącza, aby przeniesienie obciążenia odbywało się poprzez ścinanie w płaszczyźnie kleju. Obserwacja ta ogranicza liczbę zalecanych kształtów połączeń klejonych. Przegląd typowych spoin do zastosowań konstrukcyjnych przedstawiono w pozycji [83]. W przeprowadzonych badaniach [84] wykazano, że nie tylko wybór materiałów łączonych, ale także wpływ zastosowanego rodzaju spoiwa może istotnie wpływać na wytrzymałość złącza. W tej kwestii można zacytować kilka prac poświęconych trwałości połączeń elementów wykonanych ze stali [85], *CFRP* [86,87,88], *GFRP* [89] i kompozytów o strukturze plastra miodu [90,91].

W przypadku połączeń klejowych różnych materiałów pojawiają się dodatkowe techniczne problemy dotyczące nierównomiernego rozkładu naprężeń ścinających wzdłuż krawędzi obciążonego złącza klejowego [60,84]. Choć obecnie dostępne są dobrze rozwinięte nieniszczące techniki kontroli, to jednak badania destrukcyjne nadal stanowią główne źródło wiedzy w przypadku oceny wytrzymałości spoin klejonych. Większość z nich dotyczy eksperymentalnego zginania belek stalowych [49,78], betonowych [77], dźwigarów stalowych [64], aluminiowych i stalowych płyt z otworami [51,52], oraz statycznych [88,89,92] i zmęczeniowych pęknięć w płytach [50,54,55]. Co więcej z uzyskanych wyników badań [93] wynika, że wytrzymałość zmęczeniowa połączenia klejonego między stalą a wzmocnieniem *CFRP* jest wyższa niż w przypadku połączenia spawanego. Liczne wyniki eksperymentalnych badań

wytrzymałości zmęczeniowej dotyczą próbek z okrągłymi otworami [51,52] lub wstępnie uszkodzonych próbek z zainicjowanymi pęknięciami [50,54,55].

W analitycznej ocenie naprężeń i rozkładu odkształceń w połączeniach klejonych stosuje się różne modele, zaczynając od najprostszego modelu średniego naprężenia ścinającego i przechodząc do dwóch ugruntowanych podejść, mianowicie modelu ścinania Volkersena [94] lub koncepcji Golanda–Reissnera ($G-R$) [95]. Wspólną cechą obu modeli jest założenie, że naprężenie ścinające jest stałe na całej grubości kleju. Główną zaletą modelu $G-R$ jest możliwość obliczania rozkładu naprężeń przy odrywaniu, co jest zgodne z często obserwowanymi w praktyce uszkodzeniami połączeń klejonych. Dla modelu $G-R$ na przestrzeni lat opracowano różne modyfikacje, które można znaleźć w [96–99]. Inny model analityczny oparty na teorii macierzy sztywności struktur ramowych został zaproponowany przez Areiza-Hurtado [100]. Główną wadą wszystkich wymienionych modeli jest ich ograniczenie dotyczące liniowo sprężystego zachowania się części łączonych i materiałów klejących. Takie podejście jest zwykle źródłem przeszacowania wyników. Wiąże się to z tym, że na utratę połączenia wpływa elastyczne, nieliniowe zachowanie się klejów. Wskazane ograniczenia zostały pominięte przez Hart-Smitha [101,102], który w zaproponowanym modelu uwzględnił nieliniowość materiałów.

Efektywność spoiny klejowej jest ograniczona nie tylko materiałem użytym na rdzeń i nakładki oraz rodzajem zastosowanego kleju, ale także grubością warstwy. Jeśli spoiny klejowe są grubsze niż określona wartość graniczna, połączenie traci swoją skuteczność. Ponadto właściwy dobór relacji pomiędzy sztywnością materiału podstawowego a nakładkami wzmacniającymi ma istotne znaczenie dla wytrzymałości połączenia [57,96,103]. Wymaga to zastosowania nakładek o zrównoważonej sztywności [84,87] i optymalnej geometrii zakończenia na końcach nakładek w celu zmniejszenia koncentracji naprężeń w kleju [84]. Ostateczna decyzja co do wyboru rodzaju spoiwa i wzmocnienia zapada po kompleksowej analizie, która uwzględnia takie aspekty jak: całkowity koszt, trwałość połączenia, sposób zabezpieczenia w ugruntowanej procedurze oceny cyklu życia [47].

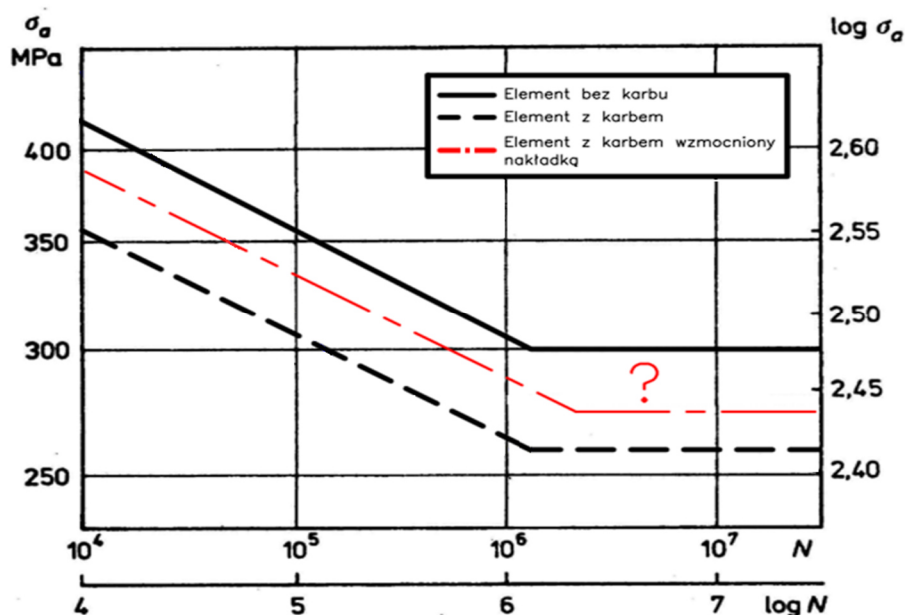
Wykonany przegląd literatury dotyczy wzmacniania elementów konstrukcji oraz sposobu jego realizacji poprzez połączenia klejone. Publikacje dotyczące bezpośrednio wzmocnień elementów konstrukcji z korbami często pomijają kwestie techniczne związane z realizacją połączenia. Stąd, pomimo bogatej literatury przedmiotu można stwierdzić, że wiedza w zakresie wzmacniania konstrukcji z korbami w postaci podcięć i otworów nie jest w pełni usystematyzowana. Głównym problemem w tego rodzaju konstrukcjach jest spiętrzenie naprężeń i nieciągłość geometryczna elementów poprzez którą zmniejszany jest przekrój przenoszący obciążenia. Dodatkowo, zastosowanie wzmocnienia powoduje konieczność analizy naprężeń występujących w kleju (np. ścinanie, odrywanie) oraz nakładkach wzmacniających.

Nie zmienia to jednak faktu, że pomimo bardziej rozbudowanego stanu obciążenia (naprężenia) można podwyższyć trwałość elementów konstrukcji osłabionych ostrym korbem za pomocą zastosowania naklejanych kompozytowych nakładek wzmacniających.

1.3. Cel pracy

Zagadnienia poruszane w pracy dotyczą badań wytrzymałości zmęczeniowej obustronnie wzmacnianych za pomocą nakładek płaskich elementów konstrukcji z otworami poddanych zmiennym obciążeniom rozciągającym przy współczynniku asymetrii cyklu $R=0,1$. Głównym celem pracy jest wykazanie korzystnego wpływu zastosowania kompozytowych nakładek wzmacniających na zwiększenie trwałości zmęczeniowej płaskich elementów konstrukcji z korbami w formie otworów. Weryfikacją osiągnięcia celu i intencji prac badawczych są: wzrost trwałości konstrukcji (N_f) i obniżenie lokalnych naprężeń wokół karbu (K_t). Dodatkowo w pracy zostanie oszacowana trwała wytrzymałość zmęczeniowa (τ) dwustronnego, symetrycznego złącza zakładkowego (*double lap joint, DLJ*), co pozwoli na odniesienie uzyskanych wyników do wzmocnionego elementu z otworem.

W przeprowadzonym przeglądzie literaturowym można wyszczególnić tylko trzy prace podejmujące bezpośrednio temat wzmocnienia rozciąganych elementów z korbami bez wprowadzonych uszkodzeń w formie pęknięć. Należy w nich zwrócić głównie uwagę na poziom obciążenia elementów (σ_{max}/Y_e) względem granicy plastyczności i uzyskane wzrostu trwałości (δ_{inc}^i). W badaniach realizowanych przez Wang Z.Y. i współautorów [51] dla stalowych elementów z otworem poziom obciążenia zawierał się w zakresie $\sigma_{max}/Y_e=0,51-0,76$, a uzyskany wzrost trwałości został określony odpowiednio na $\delta_{inc}^i=20\%-60\%$. W pracy [52], zespołu autorskiego z Wang Z.Y., dla elementów z otworem wykonanych ze stopów aluminium obciążenie względem granicy plastyczności wynosiło $\sigma_{max}/Y_e=0,23-0,88$, a uzyskane wyniki wzrostu trwałości określono na $\delta_{inc}^i=25\%-69\%$. Badania zrealizowane przez Täljsten B. i współautorów [68] obejmowały elementy z korbami które obciążono na poziomie $\sigma_{max}/Y_e=0,36$ względem granicy plastyczności, a uzyskany przyrost trwałości wyniósł $\delta_{inc}^i=145\%-274\%$. Zatem oczekiwanym rezultatem prowadzonych prac nad wzmacnianiem elementów konstrukcji są przykładowe prognozowane wyniki jak na **rys. 1.4.** – dla elementów bez i ze wzmocnieniem (czerwona linia). Przedstawioną czerwoną linię należy rozumieć jako wzrost trwałości zmęczeniowej wzmocnionego elementu konstrukcji z otworem względem elementów z otworami bez wzmocnień. Uzyskanie wyższej trwałości zmęczeniowej uzależnione jest ściśle od zastosowanego wzmocnienia (kształt, materiał) jak również od wybranego rodzaju spoiwa.



Rysunek 1.4. Krzywa Wöhlera dla wybranej stali oraz oczekiwane wyniki dla badanego elementu z karbem bez i ze wzmocnieniem nakładką kompozytową.

1.4. Zakres pracy

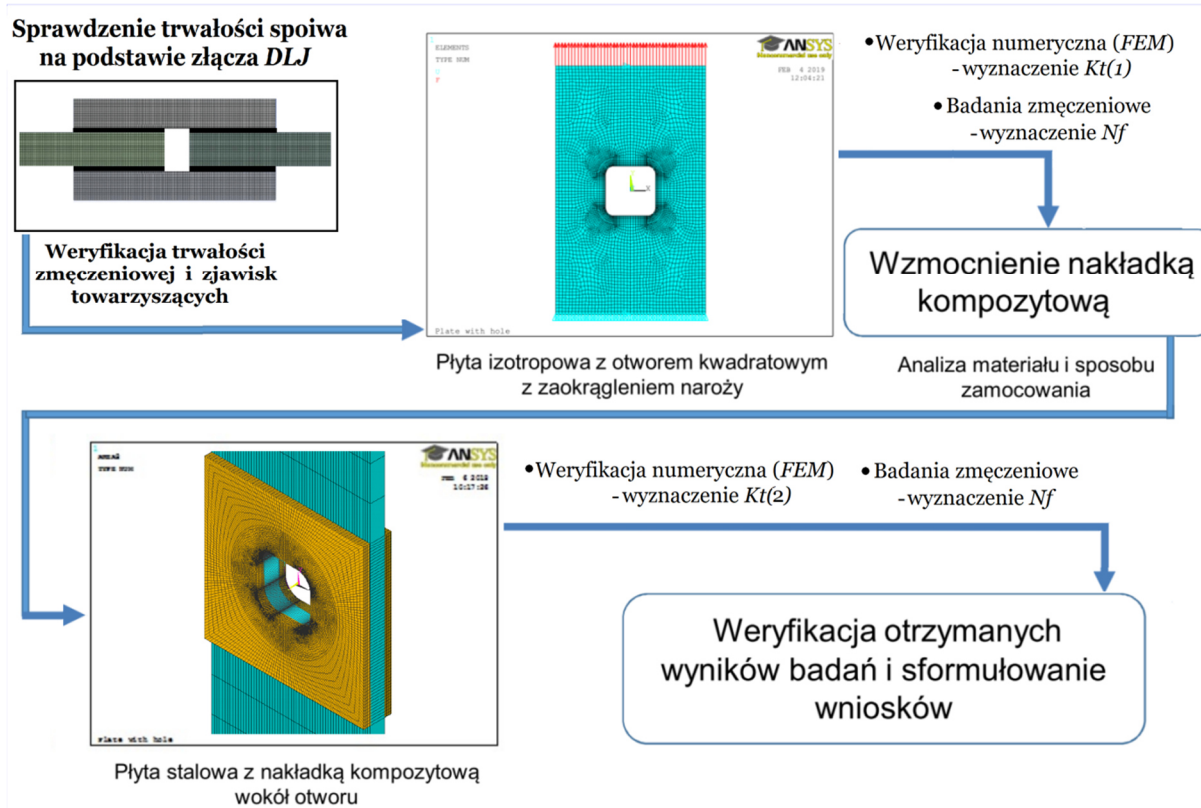
Cel pracy zostanie osiągnięty za pomocą badań eksperymentalnych i analiz numerycznych. Badania eksperymentalne polegają na przeprowadzeniu testów wytrzymałościowych wspomaganymi wykorzystaniem Cyfrowej Korelacji Obrazu (Digital Image Correlation, *DIC*). W przypadku analiz numerycznych wykorzystano metodą elementów skończonych (*MES*), która umożliwi określenie współczynnika kształtu K_t dla wybranych przypadków. Proponowane badania różnych typów wzmocnień pozwolą na weryfikację skuteczności nakładek.

Dla badanych elementów z otworami zastosowano dwustronne wzmocnienie ze względu na zapewnienie symetrii elementu i równomiernego rozkładu naprężeń i odkształceń (w praktyce grubości kleju pomiędzy poszczególnymi nakładkami a rdzeniem mogą się różnić z powodów wykonawczych). Ma to główne znaczenie w miejscach karbów, aby ich odciążenie po obu stronach było jak najbardziej zbliżone. Weryfikacji poddano również nachylenie krzywej rozciągania dla obciążenia równego granicy plastyczności stali (Y_e) dla elementów bez i ze wzmocnieniem o różnym kształcie.

Do przeprowadzenia badań przyjęto uproszczony schemat badawczy zaprezentowany na **rys. 1.5**. Zapropionowane badania wytrzymałościowe pozwalają na:

- weryfikację skuteczności zastosowanych wzmocnień w porównaniu do elementów bez wzmocnienia;
- lepsze poznanie i zrozumienie zjawisk (zniszczenia) występujących w badanych materiałach.

Ogół zaproponowanych badań ukierunkowany został na realizację celów, wraz z wskazanymi nowymi i innowacyjnymi elementami badawczymi.



Rysunek 1.5. Uproszczony schemat prowadzenia badań.

Podsumowując przedstawiony powyżej przegląd literatury wykazano, że nowatorstwo niniejszej rozprawy oparte jest o poniższe badania naukowe nad:

- możliwościami wzmocnienia elementów z otworami kwadratowymi o małym promieniu zaokrąglenia naroży;
- zastosowaniem różnego rodzaju i typu spoiw (kleje sztywne i elastyczne);
- możliwościami wykorzystania cyfrowej korelacji obrazu (DIC) do analiz związanych z weryfikacją odkształceń na powierzchni wzmocnienia.

2. Materiały i metody badawcze

W rozdziale przedstawiono wybrane do badań materiały inżynierskie wraz z zestawieniem próbek oraz metody badawcze wykorzystane w realizacji tematu i celu rozprawy doktorskiej.

2.1. Materiały badawcze

Prezentowane w rozprawie prace koncentrują się na badaniach wzmocnionych stalowych elementów konstrukcji z otworami. Wzmocnienie elementu polega na naklejeniu nakładki wzmacniającej wykonanej z odpowiedniego materiału (kompozyt) o określonym kształcie. W przypadku elementów z otworami miejscem naklejenia jest otoczenie wykonanego w badanej próbce (elemencie) otworu, które jest równocześnie miejscem lokalnego spiętrzenia naprężeń. Osłabiony otworem przekrój ma decydujący wpływ na wytrzymałość zmęczeniową badanego elementu.

Wykonanie wzmocnienia odbywa się poprzez proces klejenia, który wymaga odpowiedniego przygotowania łączonych powierzchni. Proces przygotowania uzależniony jest od wybranego sposobu klejenia. Charakterystykę materiałów wykorzystanych do badań opisano poniżej w rozdziałach.

2.1.1. Stalowe elementy konstrukcyjne

Wybrany do badań gatunek stali S355J2+N (1.0577/18G2A) jest niestopową stalą konstrukcyjną ogólnego przeznaczenia. Ze względu na swoje własności mechaniczne i dobrą spawalność materiał ten stosowany jest głównie na wysoko obciążone konstrukcje zarówno w budowie maszyn jak i w budownictwie. Typowe przykłady zastosowań to konstrukcje dźwignicowe, dźwigary suwnic, przęsła mostów i wiaduktów a także inne odpowiedzialne elementy maszyn, wytwarzane metodą spawania. Skład chemiczny stali wykorzystanej w badaniach zamieszczono w **tab. 2.1**. Własności mechaniczne zamieszczono w **tab. 2.2**. Przedstawione wyniki zostały podane jako średnie wartości wyznaczone na podstawie badań własnych przeprowadzonych dla sześciu próbek wiosełkowych przygotowanych wg. EN ISO 6892-1 dla każdej z partii materiału. Głównym dodatkiem stopowym badanej stali jest mangan (*Mn*), a własności mechaniczne zależne są od szczegółowego składu chemicznego. Zwiększenie zawartości manganu zapewnia podniesienie twardości, zwiększenie granicy plastyczności (Y_e) oraz wytrzymałości (f_u), sprężystości, a także podatności na obróbkę plastyczną. Dużą zaletą wybranej do badań stali jest także jej stosunkowo łatwa obrabialność, tj. wysoka podatność na przeróbkę plastyczną, obróbkę cieplną, możliwości spawania, jak również podatność na obróbkę ubytkową. Formowanie półproduktów oraz elementów konstrukcyjnych z S355J2 możliwe jest w operacjach kucia lub walcowania pod warunkiem zapewnienia odpowiedniego zakresu temperatur (800°C–1150°C), a obróbka cieplna polega na wyżarzaniu normalizującym w temperaturach 890°C–920°C lub wyżarzaniu zmiękczającym (<580°C). Stal S355J2 ma dobrą spawalność zarówno bez podgrzewania jak i ze wstępnym podgrzaniem przewidzianych do spawania elementów. Obróbka ubytkowa

jest również stosunkowo łatwa i pozwala na nadanie odpowiedniego założonego wstępnie kształtu. Uzyskanie zaprojektowanego kształtu możliwe jest także poprzez wykorzystanie innych metod takich jak cięcie palnikiem gazowym, plazmą jak również laserem. [7,104,105]

Tabela 2.1. Skład chemiczny stali S355J2+N.

Oznaczenie	Procentowa zawartość pierwiastków chemicznych								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Fe
S355J2+N	[%] wag.								
max. wartości wg. normy [104]	0,20	0,55	1,60	0,03	0,03	0,55	-	-	res.
S355J2+N(P1) [105]	0,19	0,20	0,99	0,01	0,01	0,03	0,04	0,02	res.
S355J2+N(P2) [106]	0,15	0,13	1,33	0,01	0,04	0,02	0,04	0,02	res.

Tabela 2.2. Własności mechaniczne stali S355J2+N.

Oznaczenie	E	ν	Y_{eH}	f_u	ϵ_u
	[GPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]
S355J2+N	210	0,3	min. 355	470-630	min. 22
wartości wg. normy [104]					
S355J2+N(P1)	192	-	365	527	31,9
S355J2+N(P2)	197	-	427	528	30,3

Próbki do badań wykonano z arkuszy blachy stalowej w stanie normalizowanym (S355J2+N) poprzez zastosowanie technologii cięcia laserem.

2.1.2. Kleje strukturalne

Mocowanie nakładek wzmacniających realizowane jest za pośrednictwem procesu klejenia. Klej (najczęściej) w stanie płynnym wprowadzany jest pomiędzy wstępnie przygotowane powierzchnie dwóch łączonych elementów, a następnie ulega procesowi utwardzania. Podstawowym składnikiem każdego z klejów jest materiał polimerowy, który w dużym stopniu decyduje o końcowych właściwościach złącza [107]. W przeprowadzonych badaniach zostały wykorzystane trzy różne typy klejów strukturalnych różniące się właściwościami mechanicznymi. Porównanie właściwości mechanicznych zawarto w **tab. 2.3**.

Tabela 2.3. Własności mechaniczne klejów strukturalnych.

Oznaczenie	E	ν	ϵ_u	f_u	τ_{adh}^*
	[GPa]	[-]	[%]	[MPa]	[MPa]
S&P Resin 220 Epoxy Adhesive [108]	7,10	0,35	<1	14,0	24,5
3M Scotch-Weld DP6310NS [109]	0,59	0,35	12	18,6	12,4
LOCTITE® HY4080GY [110]	0,36	0,35	80	11,3	15,0

*wartości wyznaczone w testach doświadczalnych na próbkach DLJ – połączenie stal-stal (S355J2+N) wg. normy ASTM D 3528

Pierwszym spoiwem jest epoksydowy klej S&P Resin 220. Jest to tiksotropowe spoiwo dwuskładnikowe o konsystencji pasty. Proces utwardzania przebiega bez skurczowo, a uzyskana struktura jest krucha. Klej ten charakteryzuje się: wysokimi własnościami modułu Younga (E) oraz:

- wysoką wytrzymałością na ścinanie (τ_{adh});
- wysoką przyczepnością do podłoża
- wykazuje odporność na działanie rozcieńczonych kwasów i soli.

Dodatkowo S&P Resin 220, jest niedyfuzyjny dla wody i pary wodnej. Spoiwo to jest przeznaczone do klejenia taśm kompozytowych S&P C-Laminate na powierzchniach stalowych, betonowych i drewnianych. Temperatury stosowania spoiwa mieszczą się w zakresie od $+8^{\circ}\text{C}$ do $+35^{\circ}\text{C}$. Czas potrzebny do uzyskania całkowitego utwardzenia kleju wynosi 168 godzin (7 dni) [56,108].

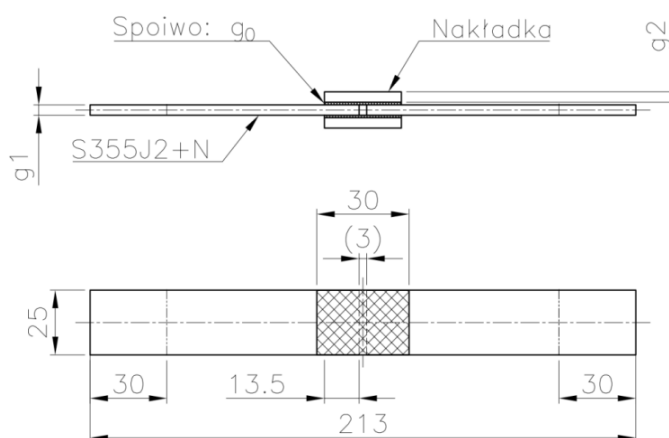
Klej strukturalny 3M Scotch-Weld DP6310NS jest dwuskładnikowym klejem poliuretanowym. Jest zalecany do klejenia materiałów kompozytowych i tworzyw sztucznych. Posiada dobrą adhezję do materiałów takich jak stopy metali, ceramika i drewno. Po utwardzeniu zachowuje swoją elastyczność i wysokie odkształcenie do momentu zerwania (ϵ_u), dzięki czemu istnieje możliwość klejenia materiałów o różnej rozszerzalności cieplnej. Temperatury stosowania tego spoiwa mieszczą się w zakresie od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Czas potrzebny do uzyskania całkowitego utwardzenia kleju wynosi 24 godzin w kontrolowanej temperaturze 22°C [109].

Trzecie spoiwo - Loctite HY4080GY - jest wysokowytrzymałym dwuskładnikowym klejem strukturalnym na bazie cyjano-akrylanu. Klej ten posiada wysoką adhezję do stopów metali, kompozytów i tworzyw sztucznych. Charakteryzuje się:

- wysoką odpornością na obciążenia udarowe i oddzieranie;
- dobrą wytrzymałością na ścinanie (τ_{adh});
- wysoką wartością wydłużenia przy zerwaniu (ϵ_u).

Temperatury stosowania spoiwa mieszczą się w zakresie od -40°C do $+150^{\circ}\text{C}$. Szybkość utwardzania uzależniona jest od klejonego materiału i od grubości szczeliny złącza – w przypadku różnych materiałów zaleca się by czas utwardzania nie był krótszy niż 168 godzin (7 dni). [110]

Kształt przygotowanych próbek typu DLJ do badań własności zakładkowych złączeń klejowych zaprezentowano na **rys. 2.1**.



Rysunek 2.1. Geometria i kształt próbek do badań złącza klejowego typu DLJ.

2.1.3. Wzmocnienia kompozytowe

Wykorzystywane w badaniach materiały do wzmocnienia elementów konstrukcyjnych to kompozyty włókniste. Wykazują one dużo wyższą wytrzymałością właściwą (f_u/ρ) niż stale i inne stopy metali, co znajduje uzasadnienie ich zastosowania do wzmocnień elementów konstrukcyjnych. Kompozyty które zastosowano do wzmacniania próbek i przebadano w rozprawie to odpowiednio:

- HEXCEL TVR380, M12/26%/R-glass/epoxy, (HEX-TVR380);
- dwukierunkowa tkanina z włókna szklanego $[0^\circ/90^\circ]$, (ROV-EP601);
- jednokierunkowa taśma kompozytowa S&P C-Laminate 150/2000, (SP150/2000).

Opis materiałów został przedstawiony poniżej, a własności mechaniczne wzmocnień kompozytowych zostały przedstawione w **tab. 2.4**.

Tabela 2.4 Własności mechaniczne wybranych wzmocnień kompozytowych [115].

Oznaczenie materiału wzmocnienia	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	G_{23} [GPa]	ν_1 [-]	ν_2 [-]	f_u [MPa]
HEX-TVR380							
HEXCEL TVR 380M12/26%/R-glass/epoxy $[+45^\circ/-45^\circ]_{4N}$ [56,59,115]	46	15	5	9	0,27	0,30	142
ROV-EP601							
E-glass woven roving/ Epidian 601 $[0^\circ/90^\circ]$ [112,115]	17	17	3	3	0,14	0,14	220
SP150/2000							
S&P C-Laminate 150/2000 $[0^\circ]$ [114,115]	165	10	5	5	0,30	0,30	2800

Kompozyt HEXCEL TVR 380 M12/26%/R-glass/epoxy wytworzono z jednokierunkowych taśm prepreg techniką autoklawową. Jest to materiał typu *GFRP*. Grubość jednej warstwy taśmy prepreg wynosi 0,25mm. Zbrojenie kompozytu stanowi włókno szklane typu R, na osnowie żywicy epoksydowej. Objętość włókien w kompozycie wynosi 60%. Proces wytwarzania kompozytu w autoklawie trwał 4,5h w temperaturze 135°C, i odbywał się pod ciśnieniem 450kPa i podciśnieniem -80kPa. Zastosowania metoda do wytwarzania tego rodzaju kompozytów, wykorzystywana jest głównie w przemyśle lotniczym. Grubość wykonanego laminatu wynosi $t_{ov}=2\text{mm}$. [111]

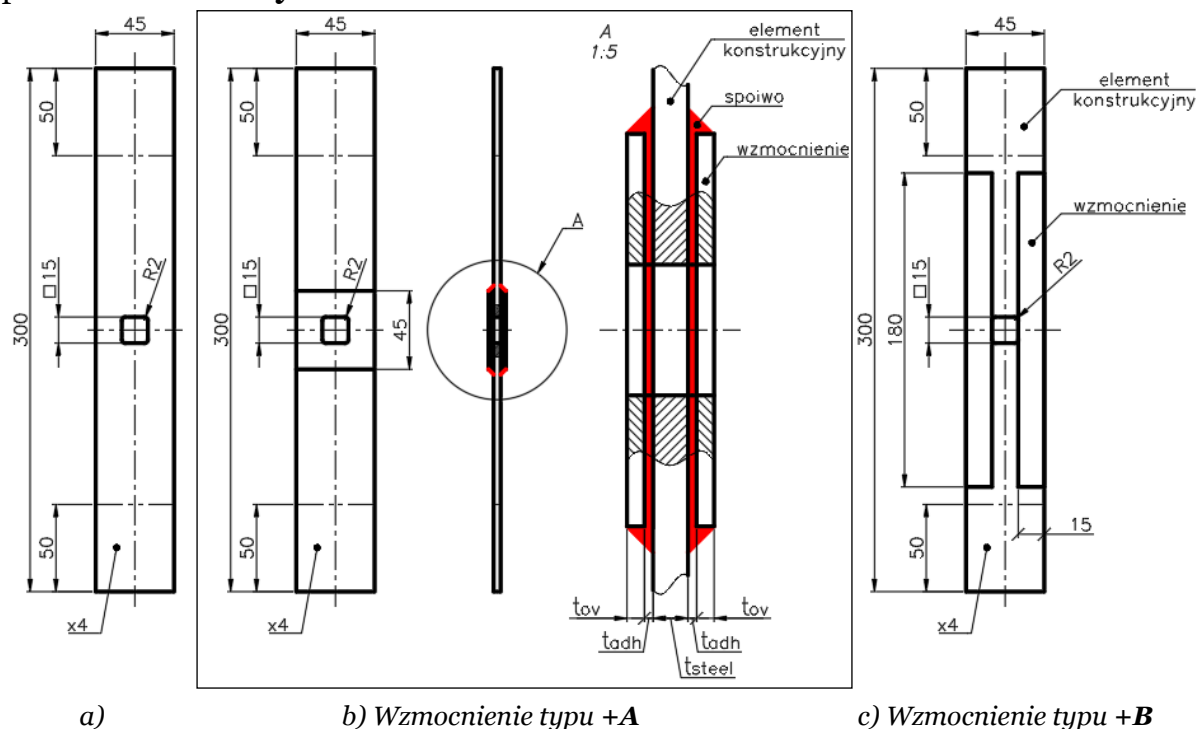
Wzmocnienie z tkaniny $[0^\circ/90^\circ]$ (*GFRP*) zostało wykonane w procesie laminowania ręcznego metodą worka próżniowego. Jest to tkanina dwukierunkowa E-glass woven roving/Epidian 601 – włókna szklane typu E na osnowie żywicy epoksydowej Epidian 601 [112]. Warunki prowadzenia procesu wynosiły -30kPa a temperatura utwardzania 80°C. Czas prowadzenia procesu 1h. Zastosowanie wskazanej kompozycji włókien i żywicy służy do wytwarzania elementów w przemyśle jachtowym, a także do wytwarzania zderzaków, kontenerów chłodni czy cystern w branży motoryzacyjnej. Grubość wykonanego wzmocnienia wynosi $t_{ov}=2\text{mm}$. [113]

Taśmę kompozytową S&P 150/2000 (*CFRP*) wytworzono w procesie pultruzji jako jednokierunkowy materiał kompozytowy, w którym włókna ułożone zostały równolegle do siebie. Zbrojenie stanowi wysokowytrzymałe włókno węglowe na osnowie żywicy epoksydowej. Objętość włókien dla wybranej taśmy wynosi powyżej 68%. Typowym i zalecanym zastosowaniem takiej taśmy jest wzmacnianie

betonowych, stalowych i drewnianych konstrukcji mostowych w miejscach, gdzie powierzchnie elementów podlegają ścisłkaniu lub rozciąganiu. Grubość zastosowanej w badaniach taśmy wynosi $t_{ov}=1,45\text{mm}$. [114]

2.1.4. Geometria i zestawienie próbek do badań

Do przeprowadzenia testów statycznych i zmęczeniowych wykorzystano różne rodzaje próbek. Geometria próbek przewidzianych do weryfikacji trwałości połączenia klejowego typu *DLJ*, wykonanych wg. normy ASTM D 3528 [116], została przedstawiona na **rys. 2.1.**, natomiast próbki z wzmocnioną strefą wokół otworu przedstawiono na **rys. 2.2.**



Rysunek 2.2. Geometria i kształt badanych elementów konstrukcji z otworem: a) element bez wzmocnienia; b) element wzmocniony nakładką 45×45 – wzmocnienie typu +A; c) element wzmocniony czterema prostokątnymi pasami 15×180 – wzmocnienie typu +B.

Zbiorcze zestawienie próbek przewidzianych do badań zostało zamieszczone w **tab. 2.5.** Tabela z wykazem próbek została podzielona według kolejności wykonywania testów eksperymentalnych. Pierwsza część dotyczy próbek typu *DLJ* przewidzianych do zbadania wytrzymałości złącza klejowego. Następnie w dalszej części tabeli wyszczególniono elementy z karbem bez i ze wzmocnieniem dla pierwszej i drugiej serii badań.

Każda z przygotowanych próbek w miejscach powierzchni klejenia została poddana specjalnej procedurze przygotowującej do klejenia. Proces przygotowania opierał się na oczyszczeniu powierzchni stali z zanieczyszczeń poprzez odtłuszczenie i zebranie zanieczyszczeń za pomocą materiałowego czyściwa nasączonego benzyną ekstrakcyjną. Następnie powierzchnia w miejscach klejenia została mechanicznie oczyszczona papierem ściernym o gradacji 100. W kolejnym kroku powierzchnia próbki została ponownie oczyszczona z pyłu po szlifowaniu czyściwem nasączonym benzyną ekstrakcyjną.

Tabela 2.5. Zbiornicze zestawienie próbek wykorzystanych do realizacji badań.

Wytrzymałość złącza – próbki typu double lap-joint (DLJ)					
Numer próbki (i)	Geometria próbki	Rodzaj obciążenia rozciągającego	Materiał nakładki	Grubość nakładki w mm	Warunki obciążenia
[-]	[-]	[-]	[-]	g_2 [mm]	[-]
1	Rysunek 2.1	Statyczne	S355J2+N	4	$v = 0,5$ mm/min
2-10	Rysunek 2.1	Zmęczeniowe	S355J2+N	4	$R=0,1$ 9 próbek do testów: $\tau_{avg,FAT} = 18,4; 14,9; 13,6;$ $13,6; 13,5; 13,4;$ $12,9; 12,0; 10,4$ MPa
11	Rysunek 2.1	Statyczne	S&P C-Laminate 150/2000; [0°]	1.4	$v = 0,5$ mm/min
12-15	Rysunek 2.1	Zmęczeniowe	S&P C-Laminate 150/2000; [0°]	1.4	$R=0,1$ 4 próbki do testów, $\tau_{avg,FAT} = 11,0, 10,4, 7,5,$ $6,0$ MPa
16	Rysunek 2.1	Zmęczeniowe etapowe z podwyższaniem obciążenia	S355J2+N	4	$R=0,1$ $\tau_{avg,FAT} =$ $1,48 \rightarrow 4,44 \rightarrow 7,41$ $\rightarrow 10,37 \rightarrow 13,48$ MPa
PIERWSZA SERIA BADAŃ – próbki S355J2(P1) z karbem					
x	Opis próbki		Warunki obciążenia	Orientacja włókien nakładki θ	Ilość próbek
	RDZEŃ_SPOIWO_WZMOCNIENIE+RODZAJ		[-]	[°]	[-]
STATYKA	S355J2(P1)_bez wzmocnienia (rys.2.2a)			-	1
	S355J2(P1)_SP220_HEX-TV380+A (rys.2.2b)		$v=0,5$ mm/min	[+45°/-45°] _{4N}	1
	S355J2(P1)_SP220_SP150/2000+B (rys.2.2c)			[0°]	1
ZMĘCZENIE	S355J2(P1)_bez wzmocnienia (rys.2.2a)		$R=0,1$ $\sigma_{max,FAT} = 296, 334, 351, 368, 384, 401, 418$ MPa	-	7
	S355J2(P1)_SP220_HEX-TV380+A (rys.2.2b)		$R=0,1$ $\sigma_{max,FAT} = 296(\times 2); 334(\times 2); 351; 368; 384; 401; 418$ MPa	[+45°/-45°] _{4N}	9
	S355J2(P1)_SP220_ROV-EP601+A (rys.2.2b)			[0°/90°]	1
ZMĘCZENIE	S355J2(P1)_SP220_SP150/2000+A (rys.2.2b)		$R=0,1$ $\sigma_{max,FAT} = 368$ MPa	[0°]	1
	S355J2(P1)_SP220_SP150/2000+B (rys.2.2c)			[0°]	1
DRUGA SERIA BADAŃ – próbki S355J2(P2) z karbem					
STATYKA	S355J2(P2)_bez wzmocnienia		$v=0,5$ mm/min	-	1
ZMĘCZENIE	S355J2(P2)_bez wzmocnienia			-	3
	S355J2(P2)_SP220_SP150/2000+B		$R=0,1$		4
	S355J2(P2)_DP6310_SP150/2000+B		$\sigma_{max,FAT} = 396$ MPa	[0°]	3
	S355J2(P2)_HY4080_SP150/2000+B				3

2.2. Metody i narzędzia badawcze

W celu uzyskania wyników doświadczalnych wykorzystano następujące narzędzia badawcze w postaci:

- maszyny wytrzymałościowej MTS Landmark 370.10;
- techniki cyfrowej korelacji obrazu (*DIC*);
- metody elementów skończonych (*MES*).

Wymienione narzędzia badawcze zwięźle opisano poniżej.

2.2.1. Stanowisko badawcze MTS Landmark 370.10

Maszyna wytrzymałościowa MTS Landmark 370.10 [117] jest zaawansowaną technicznie maszyną serwo-hydrauliczną przeznaczoną do badań statycznych i zmęczeniowych. Podstawowe dane techniczne maszyny [118] zostały w **tab. 2.6**.

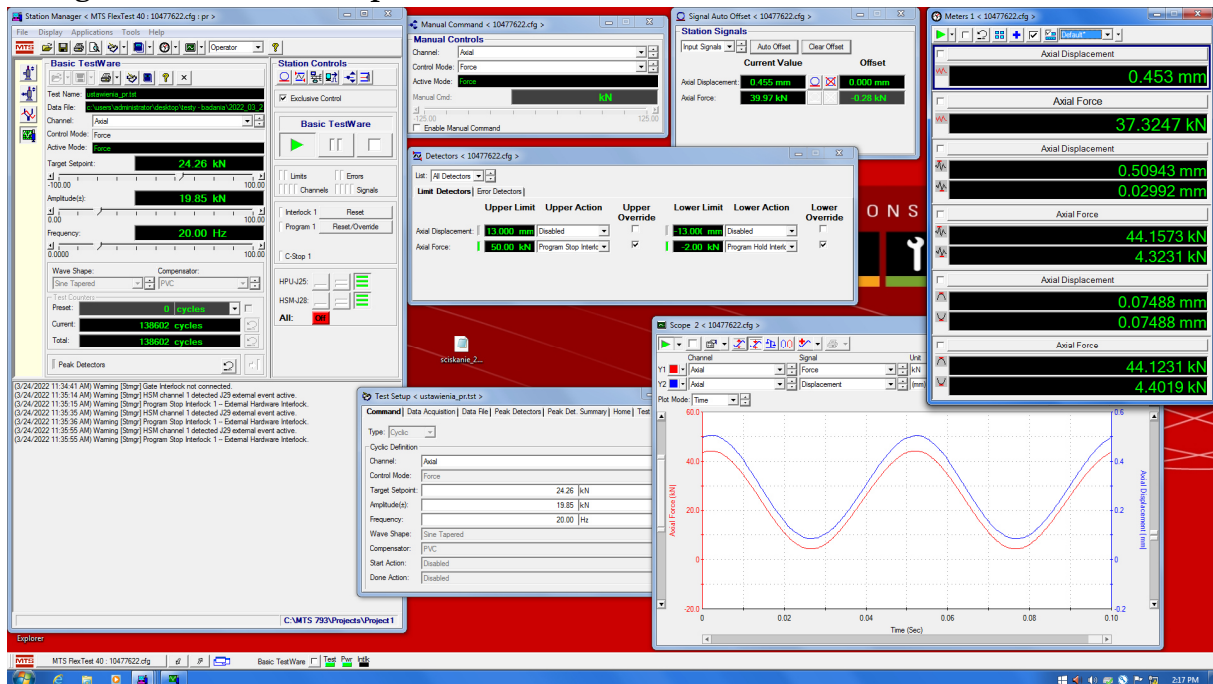
Tabela 2.6 Podstawowe dane techniczne maszyny wytrzymałościowej [117,118].

<i>Parametr</i>	<i>Jednostka</i>	<i>Model: MTS Landmark 370.10</i>
<i>Maksymalna siła siłownika</i>	<i>kN</i>	<i>100</i>
<i>Dostępne wartości znamionowe siłownika (nominalne)</i>	<i>kN</i>	<i>15, 25, 50, 100</i>
<i>Dynamiczny skok siłownika</i>	<i>mm</i>	<i>250</i>
<i>Robocza wysokość pracy maszyny</i>	<i>mm</i>	<i>922</i>
<i>Szttywność ramy</i>	<i>N/m</i>	<i>467 × 10⁶</i>
<i>Masa</i>	<i>kg</i>	<i>635</i>

Tego rodzaju system badawczy zapewnia dużą wydajność i elastyczność wykonywanych badań. Daje on możliwość przeprowadzania badań dla szerokiego zakresu materiałów inżynierskich – od elastomerów i tworzyw sztucznych po aluminium, kompozyty, stopy metali oraz stale. Budowa maszyny oraz zakres obciążeń pozwalają na badania zarówno małych próbek laboratoryjnych jak i większych elementów konstrukcyjnych, w tym wypadku ograniczeniem są konieczność posiadania odpowiednich uchwytów mocujących oraz rozmiar przestrzeni roboczej maszyny. Precyzyjne zadawanie obciążeń badanych próbek zostało zapewnione dzięki wyposażeniu maszyny w specjalistyczne oprogramowanie i kontrolery. Pozwala to na bieżącą rejestrację i zapisywanie plików z wykonywanych badań. Dzięki temu możliwa jest analiza dowolnego fragmentu badania i odczytanie parametrów obciążenia próbki we wskazanym czasie – **rys. 2.3**. prezentuje układ okien sterowania maszyną.

Dodatkowym atutem wykorzystywanej maszyny wytrzymałościowej jest system mocowania próbek – korzysta on z hydraulicznych szczęk mocujących, w których zaciskane są badane elementy. W zależności od badanego elementu istnieje możliwość regulacji siły zaciśnięcia uchwytów. Spełnia to kluczową rolę dla badania próbek o zróżnicowanej twardości – nieprawidłowy dobór siły zacisku może

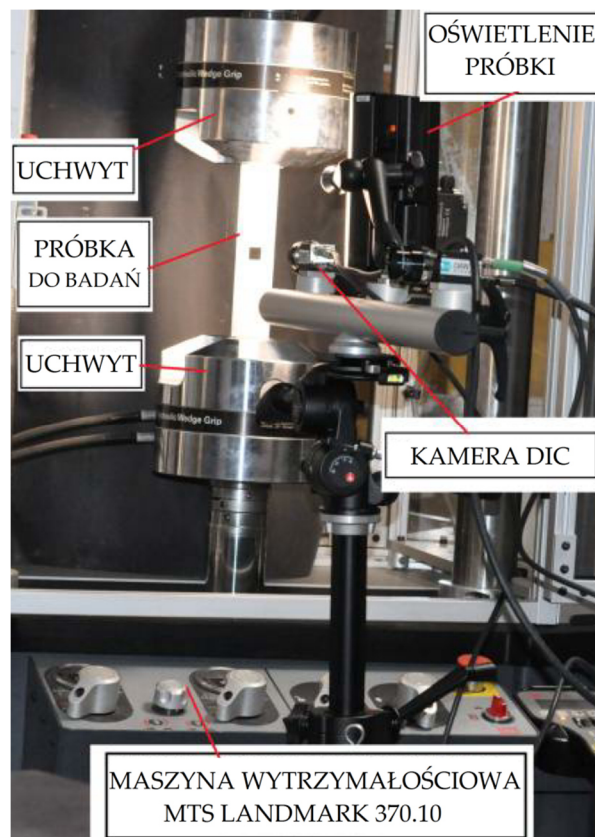
spowodować uszkodzenie próbki w uchwycie. Stanowisko do badań przedstawiono na **rys. 2.4.a**, natomiast dodatkowe oprzyrządowanie służące do wykorzystania techniki cyfrowej korelacji obrazu (*DIC*) zaprezentowano na **rys. 2.4.b**. Technika *DIC* została szczegółowo omówiona w podrozdziale 2.2.2.



Rysunek 2.3. Oprogramowanie i system sterowania maszyną wytrzymałościową.



a)



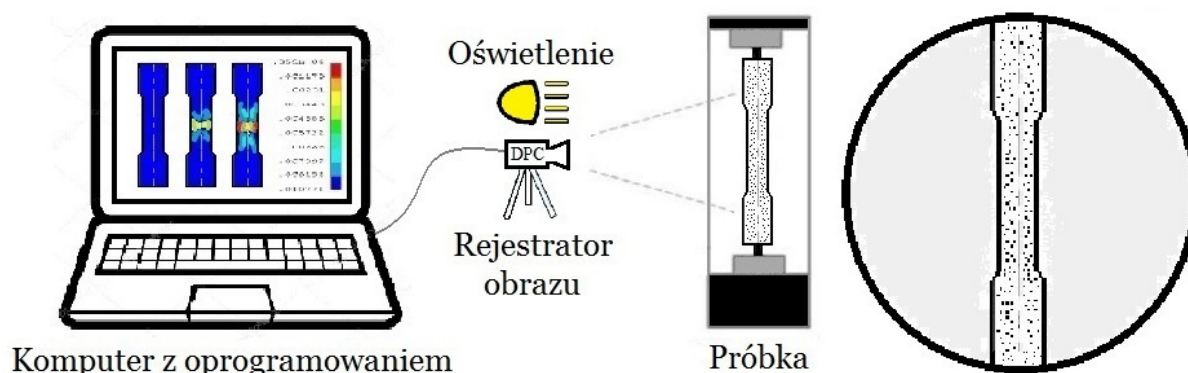
b)

Rysunek 2.4. Stanowisko badawcze: a) maszyna wytrzymałościowa MTS Landmark 370.10; b) stanowisko z oprzyrządowaniem do cyfrowej korelacji obrazu (*DIC*).

2.2.2. Technika Cyfrowej Korelacji Obrazu (DIC)

Cyfrowa korelacja obrazu (DIC) [119] jest techniką pomiarową pozwalającą na dokonywanie bezkontaktowych pomiarów przemieszczeń na powierzchni badanego elementu. Następnie poprzez wykorzystanie specjalistycznego oprogramowania istnieje możliwość wyznaczenia odkształceń. Pomiar może odbywać się w czasie rzeczywistym lub po wykonaniu serii obrazów, które zostaną poddane analizie po zakończeniu badania. Przed przystąpieniem do pomiarów należy odpowiednio przygotować powierzchnię próbki poprzez naniesienie wzoru plamkowego (*speckle pattern*). Poprzez wzór plamkowy rozumie się zapewnienie wysokiego kontrastu pomiędzy tłem a naniesionymi plamkami na badanej powierzchni. Najczęściej wzór ten realizowany jest w postaci białego tła i czarnych kropek (punktów, plamek). Istotnym czynnikiem decydującym o dokładności uzyskiwanych wyników jest zapewnienie stałego oświetlenia próbki. Musi być ono zrealizowane poprzez źródło światła zasilane prądem stałym. Zastosowanie oświetlenia zasilanego prądem zmiennym powoduje nieuchwytne gołym okiem migotanie padającego strumienia światła. Prowadzi to do zmiany kontrastu i jasności na wykonanych zdjęciach. Co powoduje błędne bądź dwuznaczne wyniki obserwacji.

Zaleca się, aby wykonane zdjęcia były monochromatyczne. Dodatkowo w celu uzyskania poprawnego i ostrego zaznaczenia krawędzi elementu w programie należy zapewnić kontrastujące otoczenie próbki. Uproszczony schemat stanowiska badawczego zamieszczono na **rys. 2.5**.



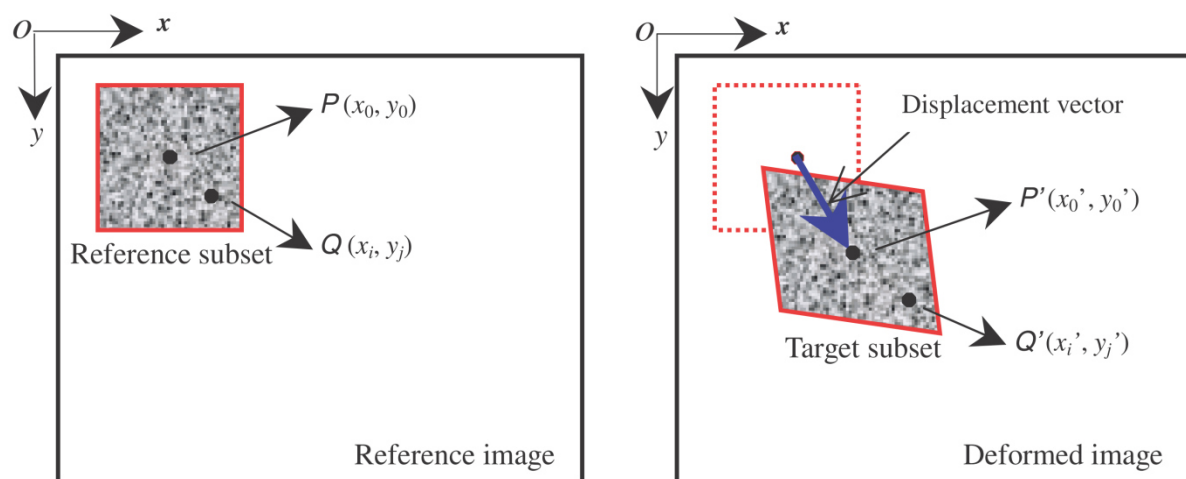
Rysunek 2.5. Uproszczony schemat stanowiska badawczego – technika cyfrowej korelacji obrazu DIC.

W pierwszej kolejności przed rozpoczęciem badania należy wykonać zdjęcie nieobciążonego elementu, który został odpowiednio przygotowany i zamocowany w uchwytach maszyny. Jest to zdjęcie referencyjne będące odniesieniem do zdjęć wykonywanych w trakcie zadawania obciążeń. W zależności od rozdzielczości zdjęcia ustalana jest wielkość fasetek (obszarów z wybraną ilością pikseli) oraz odległość pomiędzy nimi. Analiza uzyskanych deformacji możliwa jest do momentu zapewnienia ciągłości wzoru plamkowego. Na błąd pomiarowy ma wpływ kilka czynników takich jak kontrast, gęstość, wielkość plamek czy oświetlenie. Do wykonania analiz wykorzystano oprogramowanie GOM Correlate 2018.

Technika *DIC* może zostać wykorzystana do badań obiektów płaskich oraz przestrzennych (2D i 3D). W przypadku przestrzennej oceny (3D) system *DIC* musi być wyposażony w co najmniej dwie kamery, które dodatkowo muszą zostać ze sobą skalibrowane. W badaniach które były prowadzone w celu realizacji rozprawy użyto jednej kamery (urządzenia rejestrującego), która umożliwia uzyskanie wystarczającej oceny poddanych deformacji obiektów 2D. Jako urządzenie rejestrujące obraz wykorzystywano aparat Nikon D90 oraz system DANTEC DYNAMICS z obiektywem Xenoplan 1.4/23-0902. Pomimo technicznych różnic oba rozwiązania pozwalają na uzyskanie satysfakcjonujących wyników umożliwiających analizę.

Zasada działania techniki *DIC* opiera się na śledzeniu tych samych punktów (fasetek) lub pikseli na obrazach zarejestrowanych przed i po deformacji obiektu. Przykład takiego obiektu został zaprezentowany na **rys. 2.6**. Na zdjęciu referencyjnym (**rys.2.6.a**) można wyszczególnić punkty $P(x_0, y_0)$ i $Q(x_i, y_i)$. Opierając się na założeniu ciągłości deformacji odkształconego obiektu, zbiór sąsiadujących punktów w podzbiorze odniesienia pozostaje punktami sąsiednimi w podzbiorze docelowym. Zatem po deformacji podane wyżej punkty przyjmują pozycje $P'(x_0', y_0')$ i $Q'(x_i', y_i')$. W dalszych analizach wykorzystywane są różne kryteria korelacji – głównie opierające się na dopasowaniu danego podzbioru a nie pojedynczego piksela. Powodem tego jest to, że podzbiór zawierający większe zróżnicowanie poziomów szarości będzie odróżniał się od innych podzbiorów, a zatem może być łatwiej identyfikowany na zdeformowanym obrazie.

Dokładne omówienie i wyjaśnienie zasady działania techniki cyfrowej korelacji obrazu zostało opisane w publikacji Pan B. [119].



Rysunek 2.6. Schematyczna ilustracja elementu przed i po deformacji: a) zdjęcie referencyjne; b) zdjęcie prezentujące deformację obiektu. [119]

2.2.3. Metoda Elementów Skończonych (*MES*)

Metoda Elementów Skończonych (*MES*) jest metodą numeryczną [120] i została wprowadzona w 1956 r. i do dnia dzisiejszego pozostaje zaawansowanym narzędziem obliczeniowym inżynierów. Narzędzie to służy do rozwiązywania problemów i zagadnień z zakresu mechaniki konstrukcji, wymiany ciepła, mechaniki płynów, przepływów, pól magnetycznych czy zagadnień pól sprzężonych i innych zagadnień z zakresu modelowania numerycznego. Idea metody polega na wykorzystaniu dwóch zabiegów: dyskretyzacji oraz aproksymacji. Obszar w którym poszukuje się przybliżonego rozwiązania zostaje podzielony na małe podobszary (elementy skończone) w których rozwiązanie aproksymowane jest za pomocą stosunkowo prostych wielomianowych funkcji bazowych. Takie podejście pozwala zamienić problem opisany układem równań różniczkowych wraz z warunkami brzegowymi lub początkowymi na zadanie algebraiczne. Metoda elementów skończonych (*MES*) pozwala na rozwiązanie problemów inżynierskich dla których nie ma możliwości uzyskania rozwiązania analitycznego [121]. Na tej podstawie rozwiązywane jest wiele złożonych i skomplikowanych zagadnień z różnych gałęzi techniki i zagadnień przemysłowych – od lotnictwa, poprzez przemysł maszynowy oraz konstrukcje budowlane i inne.

Praktyczne wykorzystanie *MES* wymaga od użytkownika wyspecjalizowanej wiedzy i umiejętności. Jest to konieczne nie tylko ze względu na efektywne, sprawne oraz skuteczne wykorzystanie metody na etapie sformułowania i uruchomienia zadania numerycznego ale i na etapie interpretacji i weryfikacji uzyskanych wyników. Zagadnieniem, które nie posiada analitycznego rozwiązania jest realizowany temat rozprawy doktorskiej związany z wzmacnianiem płaskich elementów konstrukcji z otworami poprzez nakładki kompozytowe [121], tak więc zastosowanie *MES* może w tym przypadku służyć do weryfikacji otrzymanych wyników badań doświadczalnych.

Główne korzyści, wynikające z zastosowania *MES* (metody numerycznej) to [121]:

- możliwość analizowania złożonych problemów dla których nie są dostępne rozwiązania analityczne;
- rezygnacja z uproszczeń wykonywanych przy obliczeniach wykonywanych metodami analitycznymi;
- możliwość stosowania dokładniejszego opisu materiału i jego własności (wzmocnienie plastyczne, ortotropia, zależność stałych materiałowych od temperatury);
- możliwość rozpatrywania wielu wariantów obciążeń, warunków brzegowych lub realizacji połączenia;
- zwolnienie wykonawcy z wykonywania zadań rachunkowych. Skracca to czas wykonywania projektu a także minimalizuje możliwość popełnienia błędów i pomyłek w obliczeniach.

Poprzez zastosowanie *MES* można uniknąć wielu kosztów związanych z wykonywaniem prototypów i ich testowania, a także czasu poświęconego na wykonywanie obliczeń w sposób tradycyjny. Dodatkowo istnieje możliwość wykonania analiz wielowariantowych danego projektu. Umożliwia to uzyskanie

odpowiedzi na wątpliwości w kwestii zachowania konstrukcji przy zmianie parametrów takich jak warunki brzegowe, działanie temperatury, materiał, rozkład masy itp. [121] oraz wybór rozwiązania optymalnego w sensie przyjętego kryterium optymalizacji.

Niestety oprócz zalet metod numerycznych istnieją także zagrożenia związane z nieświadomym użytkowaniem tego narzędzia. Przy modelowaniu elementów konstrukcji, wprowadzając wiele danych i informacji podejmuje się różne decyzje. Nie każda z tych decyzji może być zgodna ze stanem rzeczywistym, i to nie ze względu na intencjonalność czy brak wiedzy, ale ze względu na pomyłkę, którą na późniejszym etapie prowadzonej symulacji będzie trudno zidentyfikować. Im większa zatem jest świadomość rozpatrywanego zagadnienia, tym mniejsza staje się możliwość popełnienia błędu. To użytkownik decyduje o wyborze poziomu analizy (model jedno- lub trójwymiarowy), typu elementu skończonego, jakości dyskretyzacji (podziału) na elementy skończone, wymiarach, danych materiałowych, warunkach brzegowych, danych o obciążeniach (miejsce działania, kierunek, wartość), a przede wszystkim o układzie jednostek. [121]

Rozwój i upowszechnianie *MES* był możliwy dzięki współpracy wybitnych matematyków, naukowców, inżynierów i programistów. Duże znaczenie w rozwoju *MES* odegrały prace Zienkiewicza O.C. i Taylora R.L. [122]. W Polsce do wdrożenia i rozwoju metody przyczynił się szereg osób poczynając od Szmeltera J. [123], poprzez Kruszewskiego J. [124], Rakowskiego G. [125], Kleibera M. [126,127], Waszczyzna Z. [128] oraz wielu innych których nie sposób wymienić.

W niniejszej pracy do wykonania analiz użyto oprogramowania ANSYS [129]. Ze względu na szeroki zakres tematyczny metody, a także na to iż w realizowanej pracy *MES* pełni funkcję narzędzia do rozwiązania wskazanych zagadnień inżynierskich, nie jest ona szczegółowo omówiona w tym rozdziale. W miejscach gdzie użyto *MES* została ona szczegółowo omówiona w zależności od rozwiązywania danego zagadnienia. Szerokie omówienie teoretycznych podstaw *MES* wraz z praktycznym zastosowaniem przedstawiono w wyspecjalizowanych pracach i podręcznikach akademickich tj.: Bielski J. [121], Łączek S. [130], czy Bąk R. i Burczyński T. [131].

3. Zmęczeniowa trwałość połączeń klejowych

W rozdziale omówiono kwestię połączeń klejowych, możliwości ich realizacji i sposobów zakończenia spoiny. Zostały omówione także zjawiska i efekty pojawiające się w trakcie obciążenia elementów z połączeniami klejowymi.

3.1. Połączenia klejowe, sposoby realizacji i formy zniszczenia

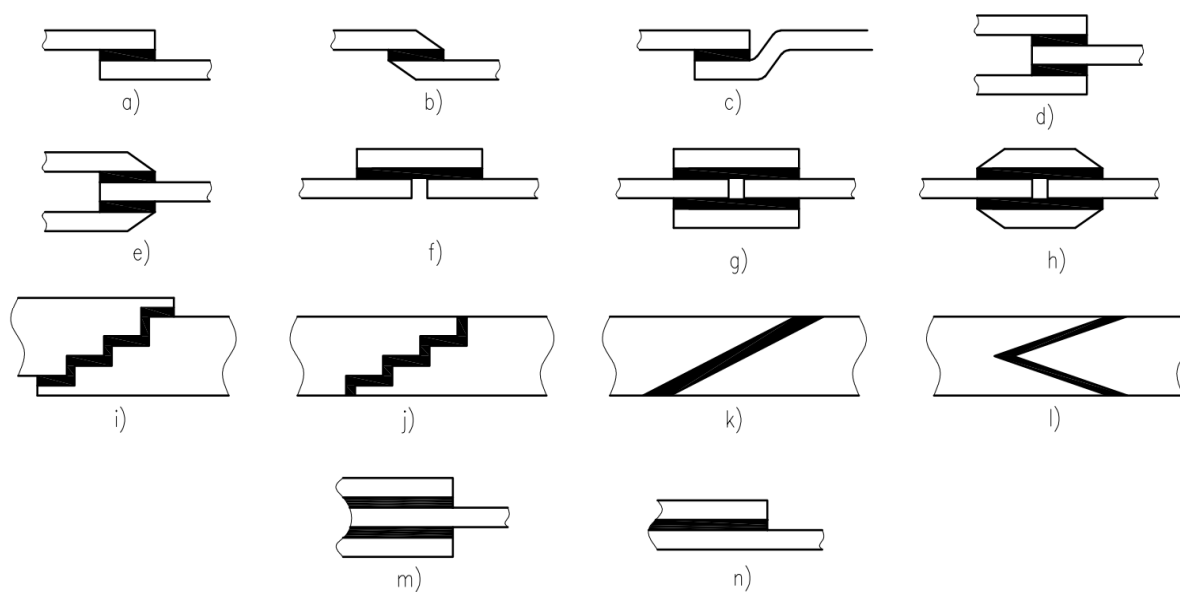
Poniżej przedstawione zostały techniczne możliwości realizacji zakładkowych i nakładkowych połączeń klejowych. Jedną z ważniejszych kwestii jest zachowanie odpowiedniej sztywności takiego połączenia [84,132]. Uproszczona relacja pomiędzy rozciągającym obciążeniem zewnętrznym (F) a uśrednionym naprężeniem tnącym w skleinie (τ_{avg}) jest zgodna ze wzorem (3.1), gdzie siła (F) odniesiona jest do powierzchni połączenia klejowego ($A_{adh} = 2 \cdot b \cdot L$) [96]:

$$\tau_{avg} = \frac{F}{2 \cdot b \cdot L} = \frac{F}{A_{adh}} \quad (3.1)$$

Określone w ten sposób naprężenie należy traktować jedynie jako wartość przybliżoną, wykorzystywaną w uproszczonych obliczeniach inżynierskich. Rzeczywisty rozkład naprężenia tnącego w połączeniu odbiega jednak od wartości uśrednionej. Na obu krawędziach zakładki pojawia się spiętrzenie naprężeń. Powoduje to różnicę odkształceń skleiny i łączonego materiału – co jest decydującym czynnikiem w inicjacji procesu niszczenia połączenia klejowego. Zatem odpowiednio dobrana sztywność materiału łączonego i zakładki to klucz do równomiernego i optymalnego rozkładu naprężeń w połączeniu. Jednakże w praktyce inżynierskiej nie zawsze istnieje możliwość zapewnienia zrównoważonej sztywności ze względu na różne grubości produkowanych półfabrykatów, oraz ich odmiennego modułu Younga E (problem ten dotyczy głównie nakładek kompozytowych). Brak zrównoważonej sztywności w połączeniu klejowym wpływa na niezbalansowany rozkład naprężeń ścinających na obu krawędziach zakładki. Kolejnym problemem jest dobór kształtu i wyprofilowania połączenia, jak również odpowiedniej grubości spoiny klejowej w celu zwiększenia jego wytrzymałości. Dodatkowym niekorzystnym zjawiskiem jest występowanie naprężenia odrywającego pojawiającego się na zakończeniach spoiny klejowej (tzw. *peeling stress* – σ_{peel}). Należy brać także pod uwagę to, aby projektowane połączenia klejowe nie były narażone na rozciąganie, które jest szczególnie niekorzystne – w przeciwieństwie do ściskania [132]. Wspomniane zjawiska będą omówione i poparte wynikami badań w dalszych rozdziałach pracy. Brak zrównoważonej sztywności w połączeniu klejowym wpływa na niezbalansowany rozkład naprężeń ścinających na obu krawędziach zakładki. Kolejnym problemem jest dobór kształtu i wyprofilowania połączenia, jak również odpowiedniej grubości spoiny klejowej w celu zwiększenia jego wytrzymałości. Dodatkowym niekorzystnym zjawiskiem jest występowanie naprężenia odrywającego pojawiającego się na zakończeniach spoiny klejowej (tzw. *peeling stress*). Należy brać także pod uwagę to, aby projektowane połączenia klejowe nie były narażone na rozciąganie, które jest

szczególnie niekorzystne – w przeciwieństwie do ściskania [132]. Wspomiane zjawiska będą omówione i poparte wynikami badań w dalszych rozdziałach pracy.

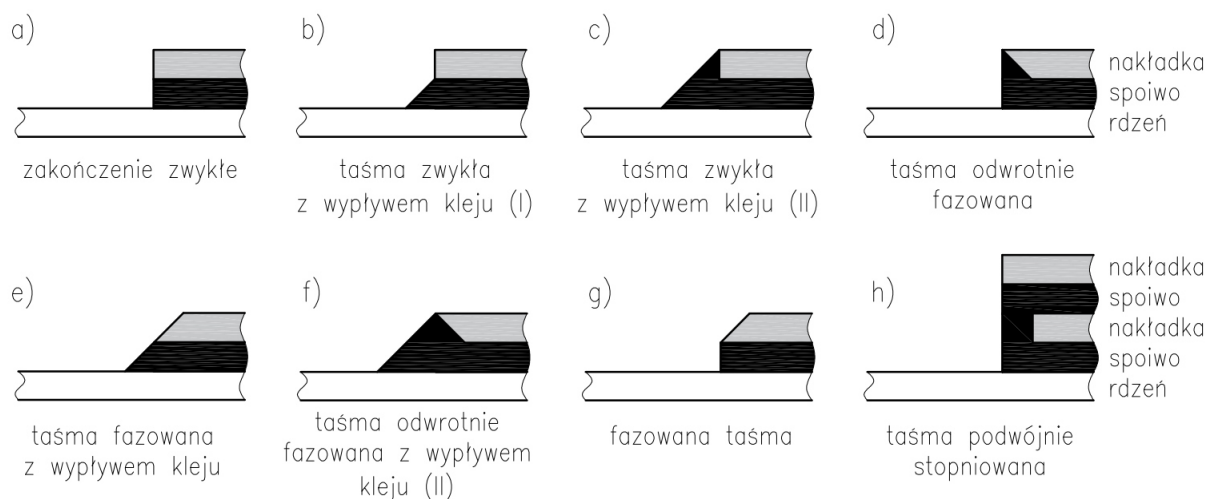
Sposób realizacji połączenia klejowego zależy od rodzaju obciążenia złącza, co wpływa na rodzaj zastosowanej sklejiny. Właściwa ocena i dobór geometrii złącza wpływa na jego trwałość i prawidłowy rozkład obciążeń w złączu klejowym. Zalecane rodzaje połączeń zostały zaprezentowane na **rys. 3.1**, który został wykonany na podstawie analizy prac [103,132].



Rysunek 3.1. Schematy połączenia elementów: a) połączenie zakładkowe; b) połączenie zakładkowe z ukosowaniem; c) zakrzywione połączenie klejowe; d) rdzeń łączony podwójną zakładką; e) rdzeń łączony podwójną nakładką z ukosowaniem; f) połączenie elementów poprzez pojedynczą nakładkę; g) połączenie elementów podwójną nakładką (double-lap joint - DLJ); h) połączenie elementów z fazowanymi nakładkami; i) połączenie schodkowe przesunięte; j) połączenie schodkowe proste; k) połączenie o ukosowanej powierzchni; l) połączenie z podwójnym ukosowaniem do kąta ostrego; m) wzmacniająca podwójne nakładki na litym elemencie; n) wzmacniająca pojedyncza nakładka na litym elemencie.

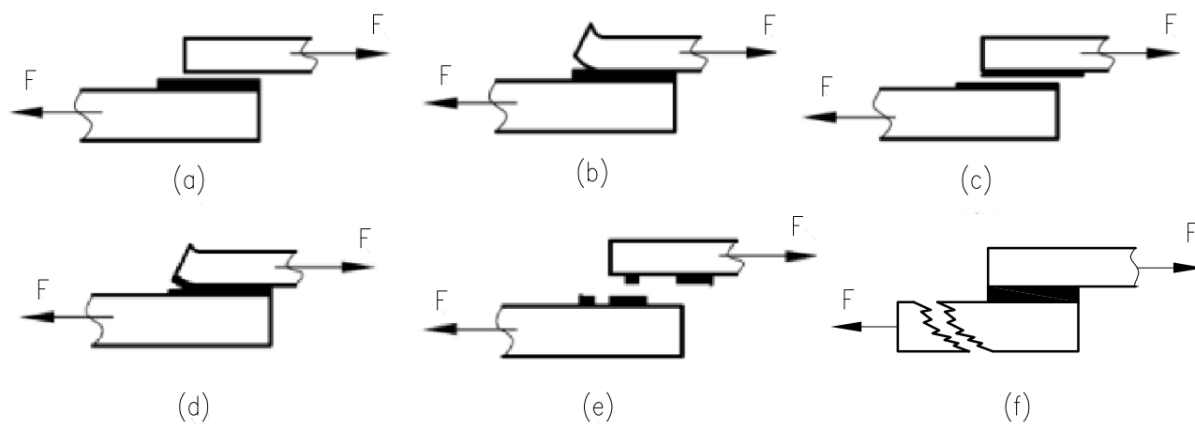
Spośród przedstawionych połączeń w zakresie badań realizowanych w rozprawie będzie pozostawało połączenie **rys. 3.1.g**. Jest to uzasadnione geometrią elementów konstrukcji z otworami w sąsiedztwie których stosowane są wzmocnienia. Obustronne połączenie nakładkowe (DLJ) jest zaliczane do najbardziej efektywnych i wytrzymałych złączy klejowych, jednakże jego technologiczne wykonanie jest kosztowne i skomplikowane [103]. Zasadniczy problem polega na precyzyjnym ułożeniu nakładek po obu stronach rdzenia – w zamian otrzymujemy w pełni symetrycznie obciążone połączenie klejowe o stosunkowo wysokiej wytrzymałości [132].

Do rozważenia pozostają również zakończenia spoiny klejowej, które mają za zadanie odciążenie końców połączenia klejowego [57,133]. Celem ich zastosowania jest obniżenie koncentracji i naprężeń odrywających (σ_{peel}). Zastosowanie konkretnego zakończenia złącza uzależnione jest od stopnia trudności i kosztowności jego wykonania. Na **rys. 3.2** zaprezentowano wybrane schematy i rodzaje kształtów zakończenia spoiny klejowej względem nakładki [133].



Rysunek 3.2. Schematy kształtów zakończenia spoiny klejowej względem nakładki [133].

Dla wymienionych możliwych sposobów realizacji połączeń (**rys. 3.1.**), a także możliwości zakończenia spoiny klejowej (**rys. 3.2.**) istnieje wiele rodzajów kombinacji. Równocześnie należy brać pod uwagę, że jakakolwiek zmiana warunków obciążenia zmieniać będzie efektywność i skuteczność połączenia wyznaczonego wcześniej jako najskuteczniejsze. Wiąże się z tym mechanizm zniszczenia połączeń klejowych [115], który uzależniony jest od wielu czynników. Wybrane formy zniszczenia złączy klejowych zostały zaprezentowane na **rys. 3.3.**



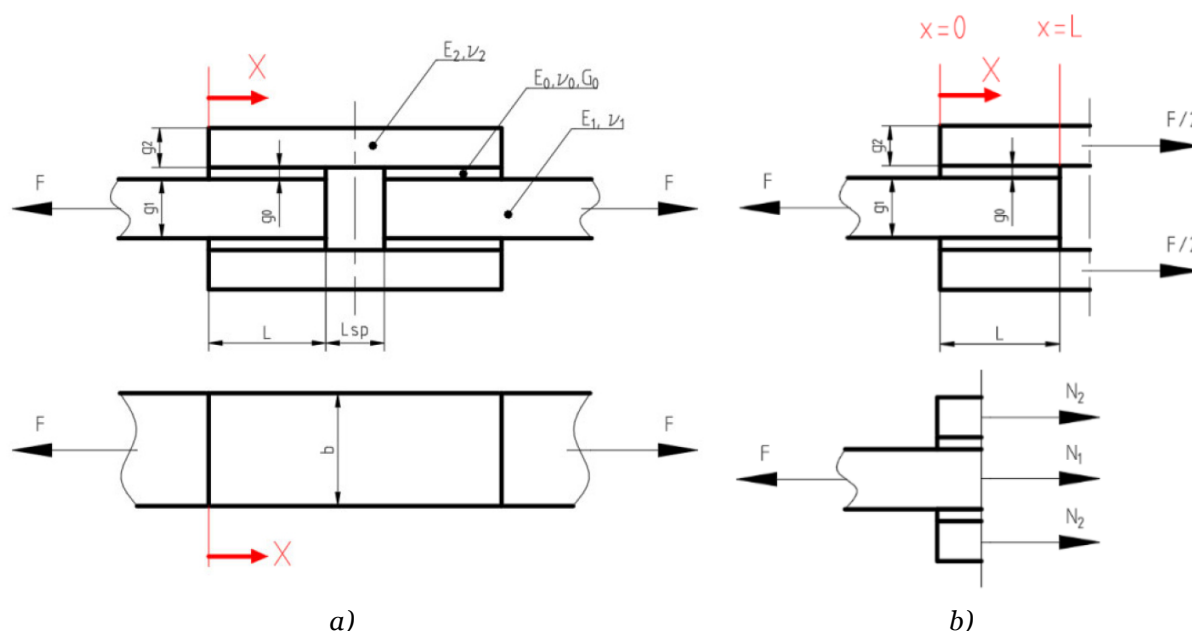
Rysunek 3.3. Formy zniszczenia połączenia klejowego: a) adhezyjne; b) poprzez odrywanie; c) kohezyjne; d) poprzez odrywanie połączone z zniszczeniem kohezyjnym spoiny; e) forma mieszana zniszczenia adhezyjnego i kohezyjnego; f) zniszczenie poza miejscem połączenia klejowego.

3.2. Teoretyczny model połączenia typu *DLJ*

Połączenie typu *DLJ* obciążone siłą F powoduje pojawienie się naprężenia ścinającego w warstwie kleju. Powstają one poprzez przeniesienie połowy wartości ($F/2$) siły zewnętrznej przez obustronnie i symetrycznie umieszczone nakładki. Jednym z uznanych i powszechnie stosowanych teoretycznych modeli złącza typu *DLJ* jest model zaproponowany przez Volkersena [94]. Zastosowane rozwiązanie opiera się na następujących założeniach:

- naprężenia ścinające są stałe po grubości kleju;
- materiał jest liniowy i elastyczny;
- odkształcenie kleju spowodowane jest wyłącznie naprężeniem ścinającym;
- odkształcenie zakładek spowodowane jest wyłącznie przez rozciąganie;
- zanedbywane są momenty zginania (powodowane przez nie osiowe działanie sił rozciągających) i naprężenia odrywające.

Geometrię modelu przedstawiono na **rys. 3.4**. Zakłada się, że połączenie może być wykonane z zastosowaniem różnych materiałów nakładek. W modelu geometria i materiały rdzenia oraz nakładek zostały określone poprzez grubość (g_i), moduł Younga w kierunku obciążenia (E_i) i współczynnik Poissona (ν_i). Indeks i oznacza odpowiednio: $i=1$ – materiał rdzenia, $i=2$ – materiał nakładek. Materiał spoiwa będącego łącznikiem został opisany jako grubość (g_o), moduł Younga (E_o), moduł Kirchoffa (G_o) i współczynnik Poissona (ν_o). Długość złącza została oznaczona jako L , a odległość (przerwa) pomiędzy dwoma łączonymi rdzeniami wynosi L_{sp} . Szerokość całej badanej próbki – rdzenia i nakładek – została określona jako b .



Rysunek 3.4. Podwójne połączenie zakładkowe: a) geometria, wymiary i własności materiałowe; b) działające siły w badanym połączeniu w kierunku x .

Generalną zasadą [84] w projektowaniu tego rodzaju połączeń jest zapewnienie zrównoważonej sztywności (κ) pomiędzy rdzeniem (κ_1) a nakładkami (κ_2). Zatem dla przedstawionego modelu (**rys. 3.4.**) zasadę tę prezentuje wzór (3.2):

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= \kappa_2; \\ \kappa_1 &= E_1 \cdot g_1; \quad \kappa_2 = 2(E_2 \cdot g_2) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Dzięki zachowaniu tej zasady po obu stronach połączenia klejowego rozkład naprężeń ścinających jest symetryczny. Jednakże nie zawsze istnieje techniczna możliwość realizacji takich połączeń. Wiąże się to z dokładnością wykonania (m.in. grubość kleju), a także grubościami dostępnych materiałów kompozytowych. Należy wtedy zwrócić szczególną uwagę na nierównomierne obciążenie sklein, co powoduje po jednej ze stron wyższą koncentrację naprężeń. Na podstawie podanych założeń i analizy obciążeń w nieskończenie małym elemencie złącza można podać analityczne rozwiązanie przebiegu naprężeń tnących w złączu.

Rozkład naprężeń ścinających w warstwie kleju można obliczyć wzdłuż osi x (**rys. 3.4.**) ze wzoru (3.3):

$$\tau(x) = \frac{1}{b} \frac{dN_2(x)}{dx} \quad (3.3)$$

Odształcenie ścinające (γ) w warstwie kleju można oszacować na dwa sposoby. Na podstawie naprężenia ścinającego (τ) i modułu ścinania (G_0 (3.4)) oraz przez uwzględnienie sztywności i sił w obu złączach (3.5):

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0}; \quad G_0 = \frac{E_0}{2(1 + \nu_0)} \quad (3.4)$$

$$\frac{d\gamma}{dx} = \frac{1}{g_0} \left(\frac{N_2}{C_2} - \frac{N_1}{C_1} \right); \quad C_1 = E_1 \cdot b \cdot g_1; \quad C_2 = E_1 \cdot b \cdot C_1 \quad (3.5)$$

Porównując wzór (3.5) z wyznaczonym równaniem (3.3) i uwzględniając zależności między siłami N_1 , N_2 i F można wykonać przekształcenia matematyczne i uzyskać następujące równanie (3.6):

$$\frac{d^2 N_2}{dx^2} - \omega^2 N_2 = -\frac{C_2}{C_1 + 2C_2} \cdot Q \cdot \omega^2 \quad (3.6)$$

gdzie (3.7):

$$\omega^2 = \frac{b \cdot G_0}{g_0} \cdot \frac{C_1 + 2C_2}{C_1 C_2} \quad (3.7)$$

Rozwiązanie dla powyższego związku można znaleźć poniżej (3.8):

$$N_2 = A_0 + A_1 \sinh(\omega x) + A_2 \cosh(\omega x) \quad (3.8)$$

Gdzie stała A_0 jest definiowana następująco (3.9):

$$A_0 = \frac{C_2}{C_1 + 2C_2} \cdot F \quad (3.9)$$

Zatem, stałe A_1 i A_2 można określić na podstawie warunków brzegowych:

- dla $x = 0$: $N = 0$;
- dla $x = L$: $N_2 = F/2$;

i wynoszą one odpowiednio (3.10), (3.11):

$$A_1 = \frac{\frac{Q}{2} - A_0 - A_2 \cosh(\omega \cdot l)}{\sinh(\omega \cdot l)} \quad (3.10)$$

$$A_2 = A_0 = -Q \frac{C_2}{C_1 + 2C_2} \quad (3.11)$$

Na podstawie powyższych wzorów można określić naprężenie ścinające w warstwie kleju jako (3.12):

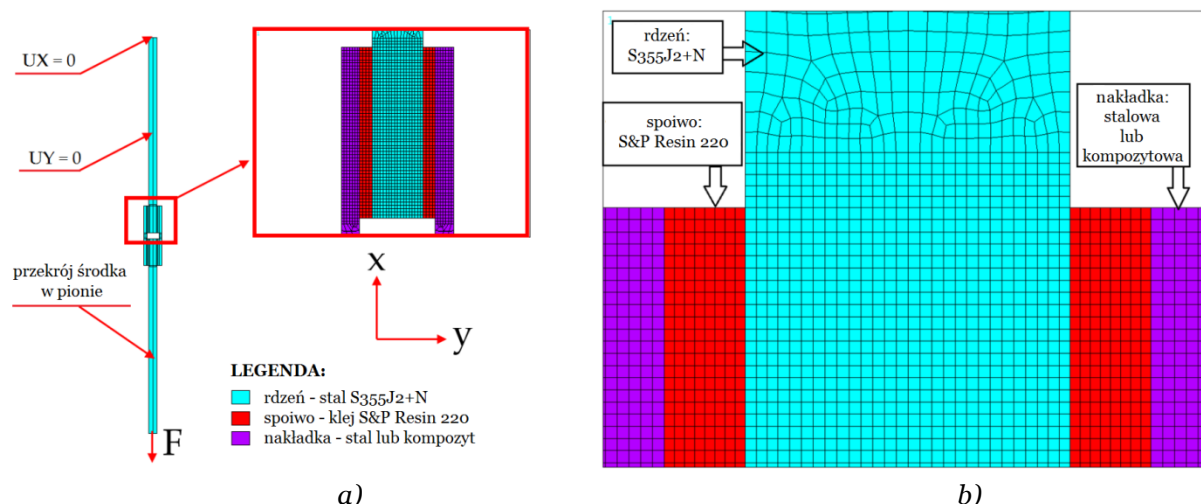
$$\tau(x) = \omega A_1 \cosh(\omega x) + \omega A_2 \sinh(\omega x) \quad (3.12)$$

Proponowany model i zaprezentowane rozwiązanie umożliwia określenie rozkładu naprężeń ścinających wzdłuż złącza dla różnych materiałów rdzenia i nakładek. Wiąże się z tym bezpośrednio możliwość wyznaczenia rozkładu naprężeń ścinających dla połączeń, które nie posiadają zrównoważonej sztywności.

3.3. Numeryczny model połączenia typu DLJ

Weryfikacja przedstawionego w powyższym rozdziale rozwiązania analitycznego możliwa jest poprzez utworzenie modelu numerycznego. W celu wykonania szczegółowej analizy wykorzystano program ANSYS [129]. Metoda Elementów Skończonych (MES) od szeregu lat jest z powodzeniem wykorzystywana do modelowania i analizy różnorodnych zagadnień z zakresu analizy konstrukcji, budowy maszyn, itd. Co więcej, dzięki stałemu i dynamicznemu przyrostowi mocy obliczeniowych stała się podstawowym narzędziem współczesnego inżyniera [134,135].

Analizę MES można przeprowadzić z różnymi poziomami przybliżenia. Zaczynając od analizy pełnego modelu 3D połączenia zakładkowego, co jest najbardziej ogólnym podejściem, pozwalającym dokładnie odwzorować geometrię modelowanych części. W przypadku badanej próbki, pełny model 3D daje pełny zestaw wyników, w tym odkształcenia i rozkłady naprężeń nie tylko wzdłuż kierunku działania siły rozciągającej (w kierunku x – **rys. 3.4.**), ale także w pozostałych kierunkach. W celu uzyskania wiarygodnych wyników należy zastosować stosunkowo duże zagęszczenie siatki modelu, szczególnie w obszarach spoiny klejowej i jej sąsiedztwie. W konsekwencji prowadzi to do czasochłonnych obliczeń numerycznych nawet w przypadku analizy liniowo-sprężystej. Zakładając brak zmian geometrii w kierunku prostopadłym do przekroju badanej próbki, podejście 3D można zredukować do podejścia 2D [56] bez utraty precyzji i dokładności rozwiązania. Takie rozwiązanie w zupełności pozwala na uzyskanie rozkładu naprężeń ścinających wzdłuż spoiny klejowej.



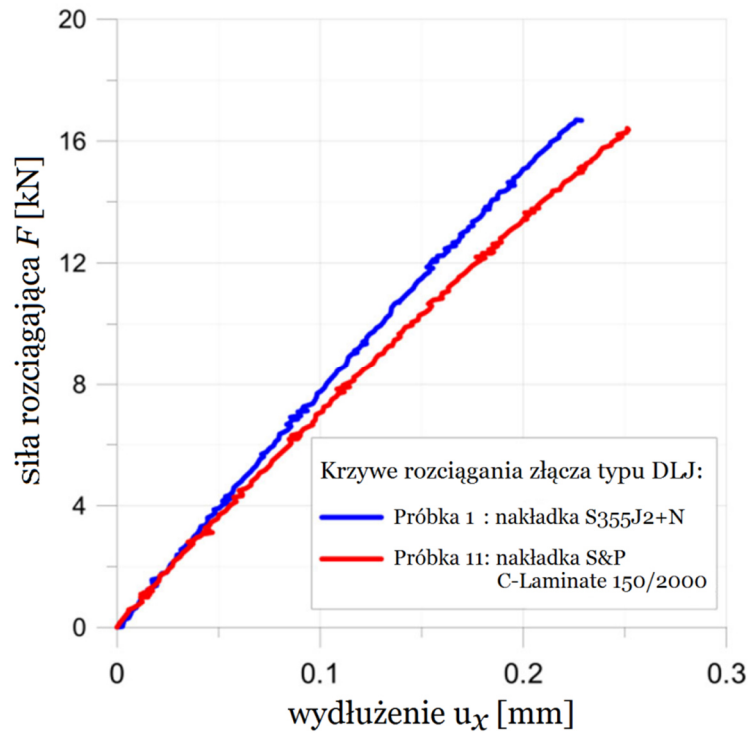
Rysunek 3.5. Model MES: a) warunki brzegowe modelu wraz z oznaczeniem materiałów; b) część modelu MES z dyskretyzacją elementów skończonych.

Kolejne uproszczenie obliczeń wynika z symetrii modelu, biorąc pod uwagę przekrój środkowy zadanie można analizować z założeniem płaskiego stanu odkształcenia. W efekcie pozwala to na znaczne zagęszczenie siatki dla modelu 2D bez znacznego wydłużania czasu obliczeń, jak miałyby to miejsce dla modelu 3D. Do analiz wybrano element skończony o nazwie PLANE183, który jest 8-węzłowym elementem strukturalnym. Na **rys. 3.5.** zaprezentowano model i wykorzystaną w obliczeniach siatkę, wraz z warunkami brzegowymi. W celu zwiększenia dokładności rozwiązań siatkę wykonano z regularnych elementów czworokątnych. Zapewnia to stosunkowo wysoką dokładność uzyskanych wyników. Jednakże, na końcach długości połączenia klejowego obserwowane są wysokie koncentracje naprężeń w postaci pików. Jest to związane z karbem geometrycznym w miejscu łączenia się materiałów, jak również z dużymi różnicami pomiędzy modułem Younga nakładek, kleju i rdzenia.

3.4. Analiza doraźnej wytrzymałości złącza typu DLJ

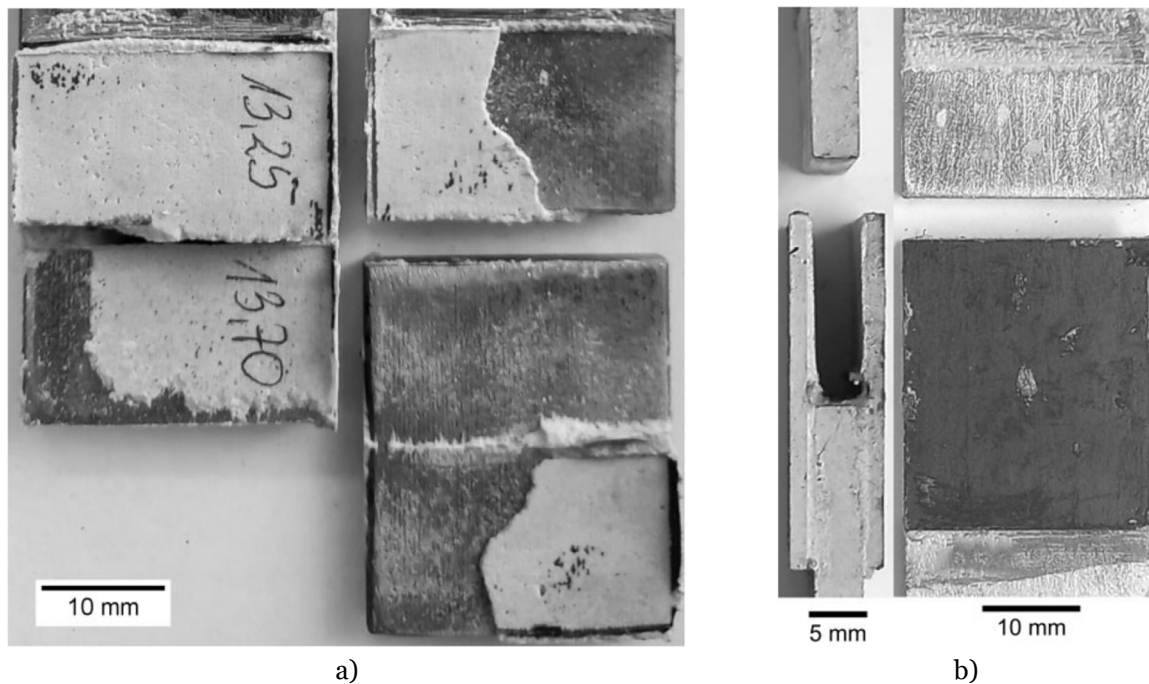
Badania wykonano dla złącza typu DLJ w dwóch wariantach zakładek (**rys. 2.1.**). Pierwszy wariant, to nakładki wykonane ze stali S355J2+N (próbka 1 – **tab. 2.5.**), drugi wariant to nakładki z kompozytu S&P C-Laminate 150/2000 (próbka 11 – **tab. 2.5.**). W obu przypadkach jako spoiwo wykorzystano S&P Resin 220 Epoxy. Wyniki zaprezentowano na **rys. 3.6.**

Dla obu przypadków otrzymano zbliżone wartości maksymalnej siły zrywającej. Wynosiła ona odpowiednio $F_{max}=16,7\text{kN}$ dla nakładek stalowych i $F_{max}=16,4\text{kN}$ dla nakładek kompozytowych. Po zniszczeniu wyżej wymienionych próbek dokonano dokładnych pomiarów powierzchni kleju w celu obliczenia uśrednionego niszczącego naprężenia ścinającego dla rzeczywistej powierzchni kleju. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie uśrednionego naprężenia niszczącego. W przypadku nakładek ze stali to $25,20\text{MPa}$, a dla kompozytu $24,66\text{MPa}$. Uzyskane wyniki są zgodne z deklarowanymi danymi producenta na temat niszczących naprężeń ścinających (**tab. 2.3.**). Dla pokazanych na **rys. 3.6.** krzywych siła-wydłużenie widać wyraźną różnicę w nachyleniu i przebiegu – jest to efekt różnych sztywności nakładek łączących rdzeń.



Rysunek 3.6. Krzywe rozciągania próbek typu DLJ dla dwóch wariantów materiału nakładek.

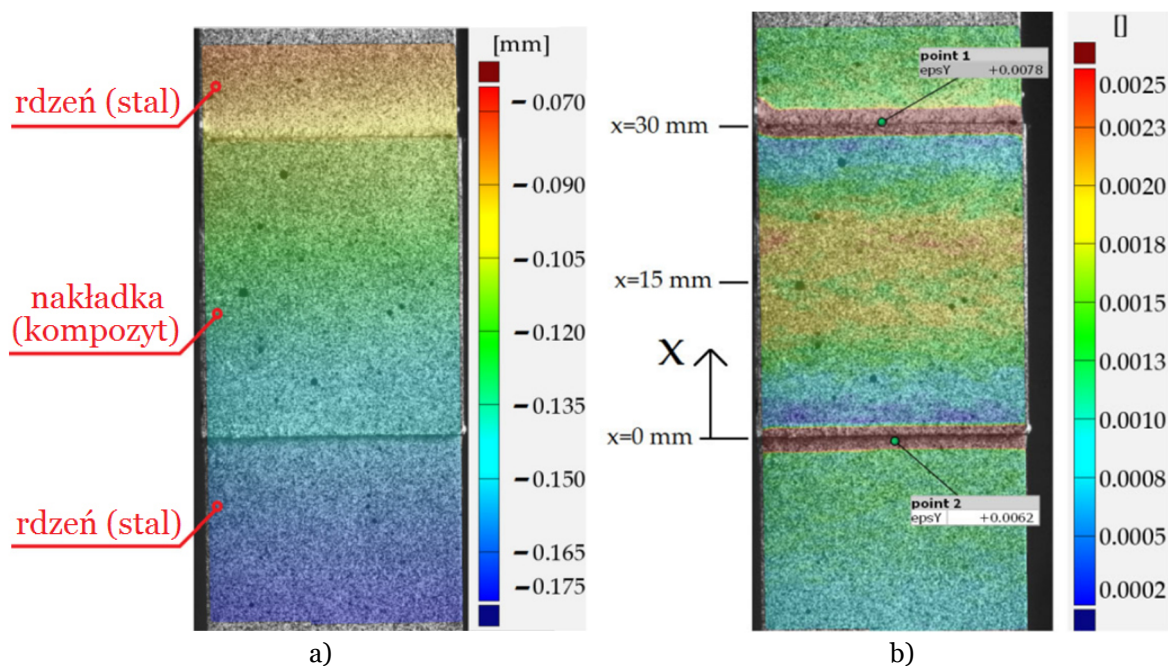
Formy zniszczenia próbek uzyskane w testach eksperymentalnych przedstawiono na **rys. 3.7**. W obu przypadkach uszkodzenie kleju nastąpiło z widocznym oderwaniem spoiwa od stalowego rdzenia.



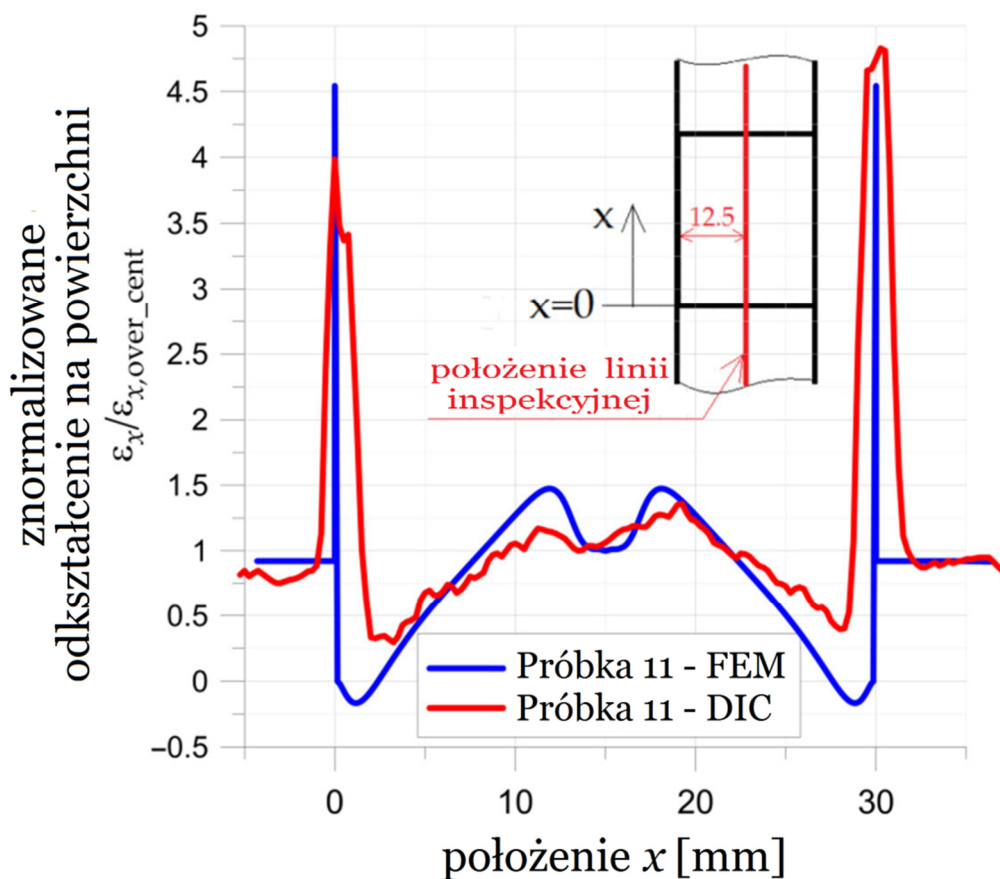
Rysunek 3.7. Formy zniszczenia połączeń klejonych typu DLJ:
a) stal-stal (próbka 1); b) stal-kompozyt (próbka 11).

Można zaobserwować, że dla badanych próbek zniszczenie przyjmuje formę adhezyjną (**rys. 3.3.a**). Oznacza to, że po zniszczeniu spoiwo pozostaje na powierzchni rdzenia lub nakładek. Zauważyć należy, że połączenia z wyższą sztywnością nakładek (tj. nakładki stalowe) względem stalowego rdzenia charakteryzują się zniszczeniem występującym po przekątnej. Zarówno na nakładkach jak i rdzeniu widoczne są mieszane formy zniszczenia adhezyjnego – część spoiwa pozostaje na nakładkach, a część na rdzeniu. Dla nakładek, które posiadają niższą wartość sztywności niż rdzeń charakterystyczne jest utrzymanie się kleju na powierzchniach kompozytu. Na stalowym rdzeniu nie pozostają żadne ślady przyczepności spoiwa.

Bardziej szczegółowe analizy wykonano z wykorzystaniem techniki cyfrowej korelacji obrazu (*DIC*) i metody elementów skończonych (*MES*). Wyniki przedstawiono na **rys. 3.8.–3.10.** dla próbki nr 11 z nakładkami kompozytowymi (taśma węglowa S&P 150/2000). Analizy obejmują bezpośrednio moment przed zniszczeniem połączenia klejonego. Mapy przemieszczeń u_x i odkształceń ε_x zostały zaprezentowane na **rys. 3.8.** Wynika z nich, że największe odkształcenie obserwowane jest na zakończeniach nakładek. Rozkład znormalizowanych odkształceń $\varepsilon_x/\varepsilon_{x,over,cent}$ został przedstawiony dla środkowej części nakładki na **rys. 3.9.** – porównanie dotyczy wyników uzyskanych za pomocą *DIC* i *MES* wzdłuż osi x . Wartość $\varepsilon_{x,over,cent}$ liczone jest wzdłuż nakładki dla środkowej części próbki dla $x=L+0.5L_{sp}=15\text{mm}$. Jednak, najważniejszą częścią jest zakres odległości pomiędzy 0 a 30, gdzie zaprezentowano odkształcenia na powierzchni nakładki. Dla zakresu $x>30$ i $x < 30$ wykres rozkładu odkształceń dotyczy zewnętrznej powierzchni górnej i dolnej części rdzenia (ze stali).



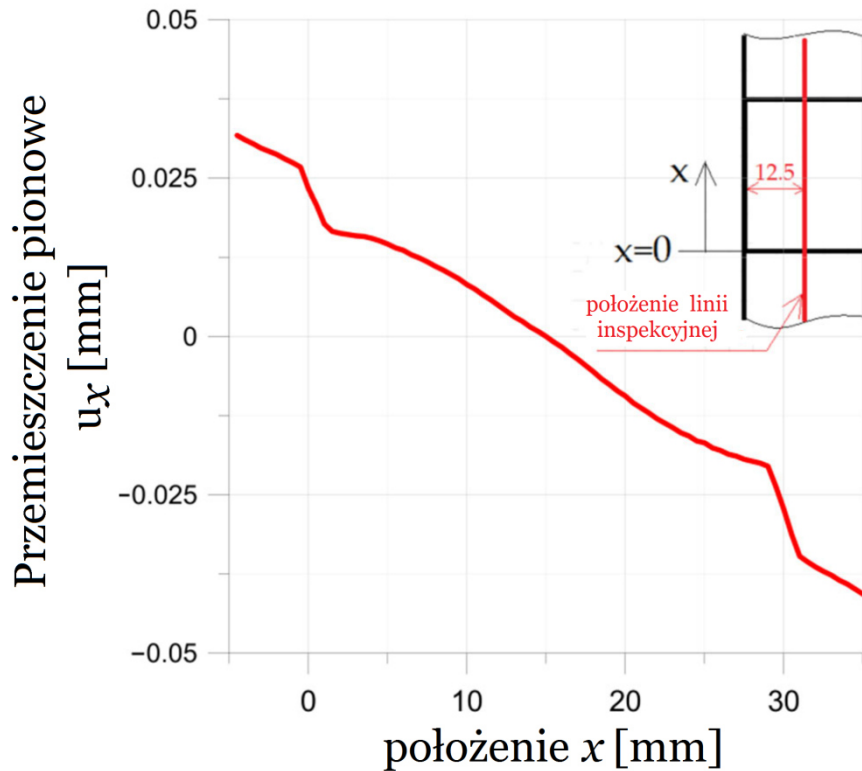
Rysunek 3.8. Wyniki analizy DIC dla połączenia zakładkowego stal S355J2 (rdzeń) – S&P 150/2000 (nakładki): a) przemieszczenie pionowe u_x ; b) odkształcenie ε_x .



Rysunek 3.9. Rozkład znormalizowanego odkształcenia na środku powierzchni próbki DLJ dla nakładek kompozytowych S&P 150/2000 – wyniki DIC i MES.

Na **rys. 3.9.** pokazano lokalny efekt w postaci pików. Zerwanie nakładek nastąpiło w momencie osiągnięcia największych lokalnych naprężeń – **rys.3.7.b.** Rozkład największych odkształceń w nakładce jest zmienny wzdłuż złącza klejowego i rośnie nieliniowo po obu stronach. Niewielkie różnice dotyczą środkowej części nakładki. Powyższe zjawiska są obserwowane zarówno w analizie *DIC*, jak również *MES*. Pewne różnice pomiędzy analizami zaobserwowano na końcach nakładek. W rozwiązaniu *MES* pojawiły się niewielkie efekty ściskania spowodowane zginaniem nakładek. Bardziej szczegółowe analizy przy mniejszych rozmiarach fasetek (tj. zwiększając rozdzielczość metody) wykazały, że odkształcenie na krawędzi dąży do zera zbiegając się z rozwiązaniem numerycznym.

Na **rys. 3.10.** rozkład przemieszczeń przy użyciu *DIC* przedstawiono tak jak poprzednio – czyli wzdłuż linii inspekcyjnej pokazanej na **rys.3.9.** Na wykresie została zarejestrowana zmiana charakteru przebiegu przemieszczeń w miejscach $x=0$ i $x=30$ – czyli dokładnie w miejscach, gdzie znajdują się końce nakładek. Jest to związane ze znacznie mniejszą wartością sztywności kleju (w odniesieniu do stali), co powoduje wzrost odkształcenia ścinającego γ w spoiwie – zostało to opisane w równaniach (3.4) i (3.5) – i wyraźne przesuwanie się rdzenia względem nakładek.



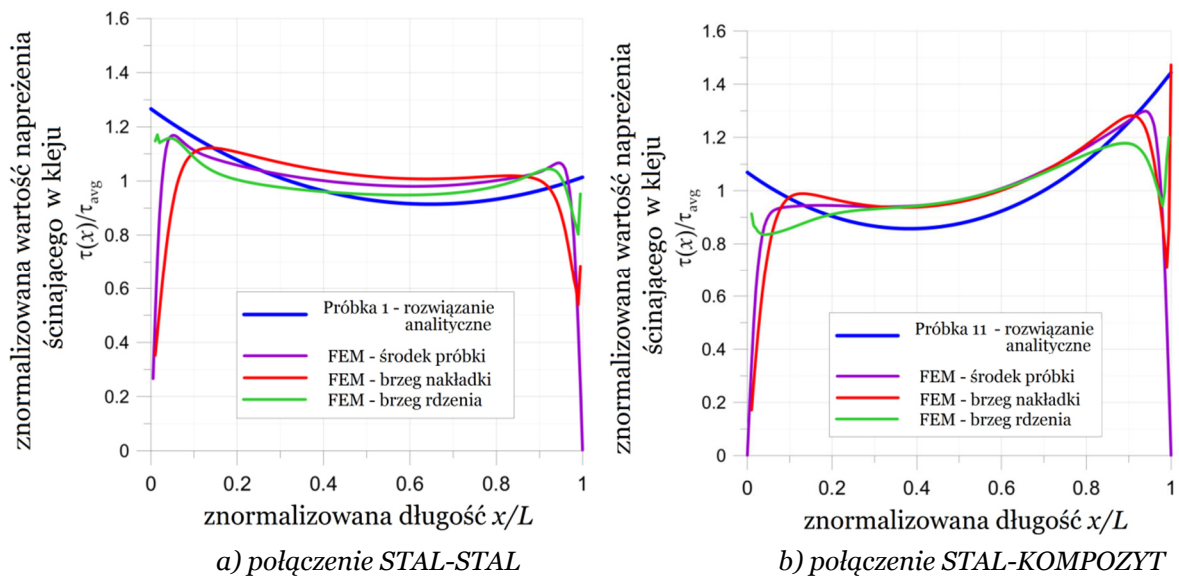
Rysunek 3.10. Rozkład przemieszczeń pionowych u_x (DIC) na środku powierzchni próbki typu DLJ z nakładkami kompozytowymi.

3.5. Rozkład naprężeń połączenia klejowego DLJ

Porównanie uzyskanych wyników z analizy *MES* i rozwiązania analitycznego zaprezentowano poniżej na **rys. 3.11**. Obliczenia zostały przeprowadzone dla maksymalnych wartości siły z przeprowadzonego testu eksperymentalnego (**rys. 3.6**). Wyniki przedstawiono w formie znormalizowanego naprężenia ścinającego w kleju, które definiuje się jako naprężenia uzyskane z analizy *MES* odniesione do naprężenia średniego uzyskanego według wzoru (3.1).

W obu zaprezentowanych przypadkach grubość kleju g_0 wynosiła 1mm. Przy użyciu *MES* obliczono rzeczywiste naprężenia ścinające na brzegu pomiędzy: 1 - stalowym rdzeniem a spoiwem, 2 - w środku spoiny klejowej, 3 - spoiną klejową a nakładką kompozytową.

W rozwiązaniu analitycznym największe wartości naprężenia pojawiają się na zakończeniach nakładek (**rys. 3.11**). Rozwiązania analityczne i uzyskane za pomocą *MES* są zgodne w dużym zakresie długości złącza, zarówno dla nakładek stalowych jak i kompozytowych. Zasadnicza rozbieżność pojawia się na końcach sklein, gdzie pojawia się karb w postaci gwałtownej zmiany sztywności, którego model analityczny nie uwzględnia. Reasumując, wyniki *MES* i rozwiązania analityczne są zbliżone do siebie, zarówno pod względem trendu, jak i wartości naprężeń poza zakończeniami nakładek.



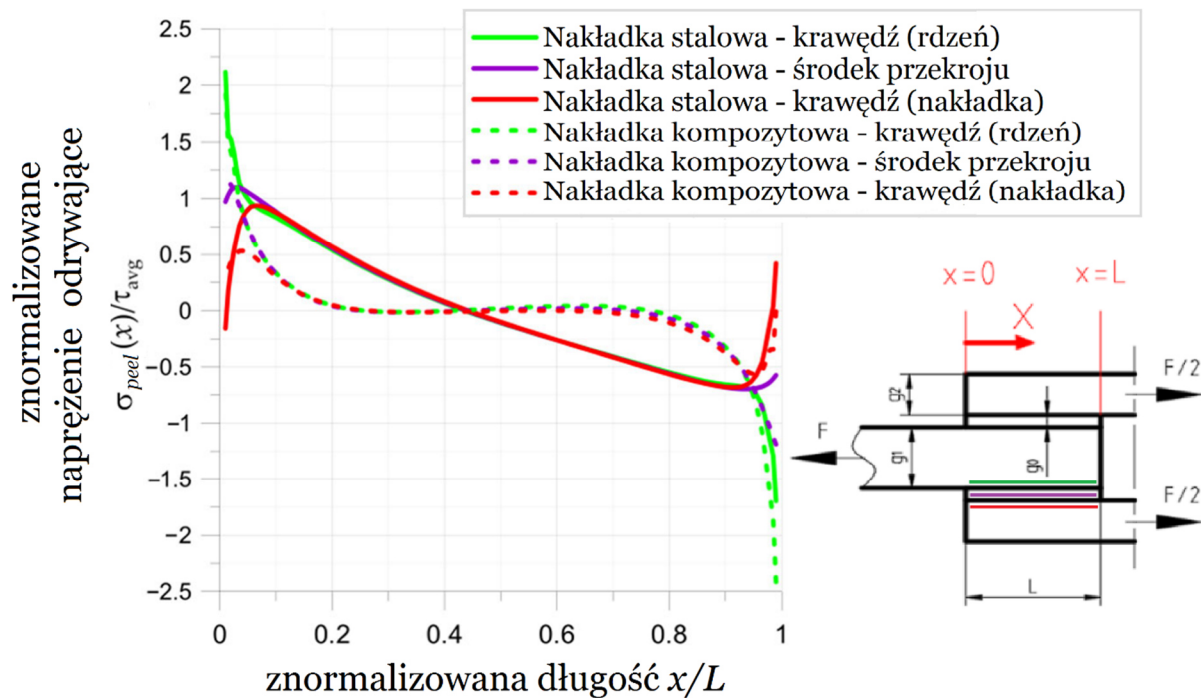
Rysunek 3.11. Rozkład znormalizowanego naprężenia ścinającego kleju w złączu DLJ dla naprężeń wyznaczonych numerycznie, oraz analitycznie dla: a) próbki 1 z nakładkami stalowymi; b) dla próbki 11 z nakładkami kompozytowymi SP150/2000.

Niesymetryczne rozkłady naprężeń na długości spoiny klejowej spowodowane są brakiem zrównoważonej sztywności nakładek. Większe różnice pod względem maksymalnych naprężeń można wskazać dla próbek z nakładkami kompozytowymi.

Wyznaczone koncentracje naprężeń na końcach są potencjalnymi punktami inicjacji uszkodzenia połączenia klejowego. Dla złącza klejowego typu DLJ ze stalowymi nakładkami maksymalne naprężenia pojawiają się w punktach końcowych połączenia ($x=0$). W przypadku złącza klejowego DLJ dla nakładek kompozytowych maksymalne naprężenia pojawiają się w miejscu, w którym zaczyna się szczelina na środku próbki ($x=L$).

Wyznaczone naprężenia ścinające w kleju są główną przyczyną zniszczenia połączenia, jednakże należy zaznaczyć, że wytrzymałość połączenia klejowego może zostać obniżona przez pojawiające się rozciągające naprężenia odrywające. Jest to zjawisko negatywnie wpływające na trwałość połączenia i zmniejszające dopuszczalne naprężenia ścinające w kleju [132]. Największe naprężenia odrywające pojawiają się na obu końcach spoiny klejowej, a źródłem ich jest pojawienie się zginania nakładek w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego próbki. Zjawisko to zostało przedstawione na **rys.3.12**, a wyniki analizy uzyskano numerycznie za pomocą MES.

W przypadku połączenia DLJ najbardziej niekorzystne miejsca znajdują się na początku i końcu pojedynczej spoiny klejowej (od $x/L=0$ do $x/L=1$). Są to miejsca gdzie naprężenia odrywające (σ_{peel}) osiągają ekstremalne wartości. W obu rozpatrywanych przypadkach najwyższe wartości naprężeń odrywających wystąpiły w kleju po stronie rdzenia. Dla nakładek stalowych ekstremalne wartości pojawiają się początku nakładki ($x/L=0$), natomiast dla nakładek kompozytowych na zakończeniu rdzenia ($x/L=1$). Największą różnicę w przebiegach znormalizowanych naprężeń (**rys.3.12.**) można zaobserwować na krawędzi nakładek i środku spoiny klejowej. Wytlumaczeniem tego stanu rzeczy są różne sztywności łączonych elementów. Więcej informacji na temat wspomnianych zagadnień można znaleźć w publikacjach [86,88,92].

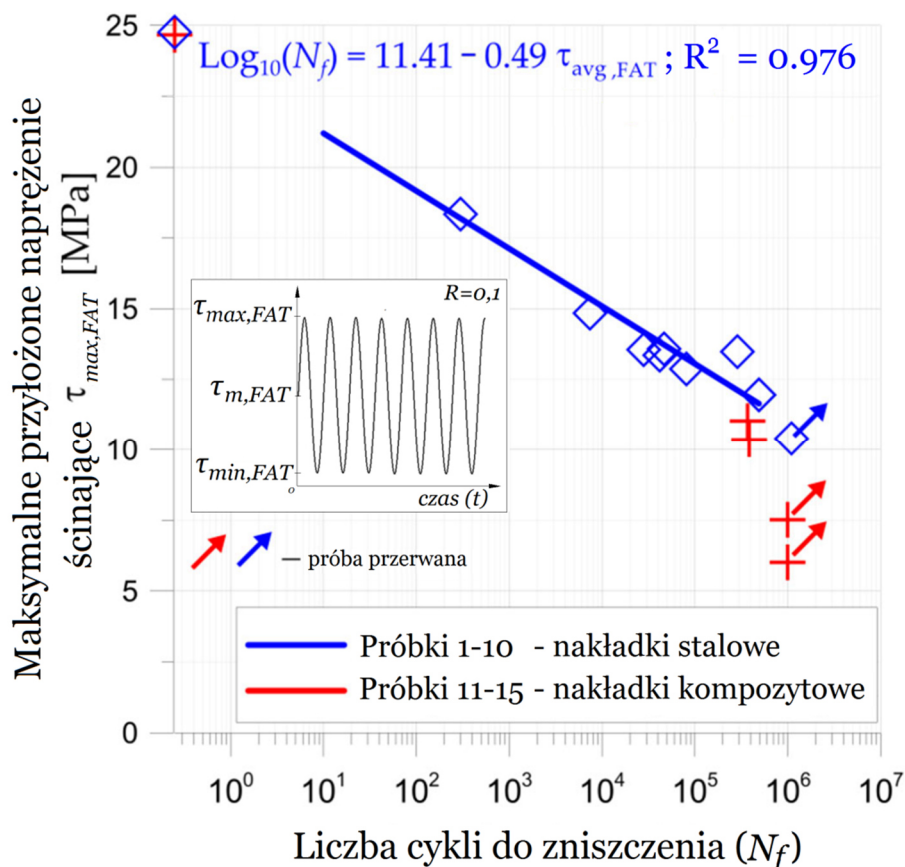


Rysunek 3.12. Rozkład znormalizowanego naprężenia odrywającego w kleju dla próbek DLJ.

3.6. Trwałość zmęczeniowa połączenia DLJ

Wyniki uzyskane w czasie przeprowadzonych testów zmęczeniowych zostały przedstawione na **rys. 3.13**. Do testów użyto dwóch typów próbek typu DLJ. Pierwszą partię stanowią próbki (nr 2-10) z nakładkami stalowymi oraz próbki z nakładkami kompozytowymi (nr 12-15). Badania zostały przeprowadzone w przedziałach od $\tau_{max,FAT}=10.40\text{MPa}$ do $\tau_{max,FAT}=18.35\text{MPa}$ dla próbek z nakładkami stalowymi. Przedziały od $\tau_{max,FAT}=6.00\text{MPa}$ do $\tau_{max,FAT}=11.30\text{MPa}$ zostały przewidziane dla próbek z nakładkami kompozytowymi (S&P 150/2000). Podane przedziały są wartościami maksymalnego naprężenia ($\tau_{max,FAT}$) zadawanego w trakcie testów, oszacowanymi na podstawie badania statycznej wytrzymałości złącza z rozdziału 3.4. Wszystkie testy przeprowadzone zostały dla cykli ze współczynnikiem asymetrii $R=0,1$. Badania zmęczeniowe zostały przeprowadzone w celu wyznaczenia trwałości zmęczeniowej dla zakresu od 300 000 do 1 000 000 cykli.

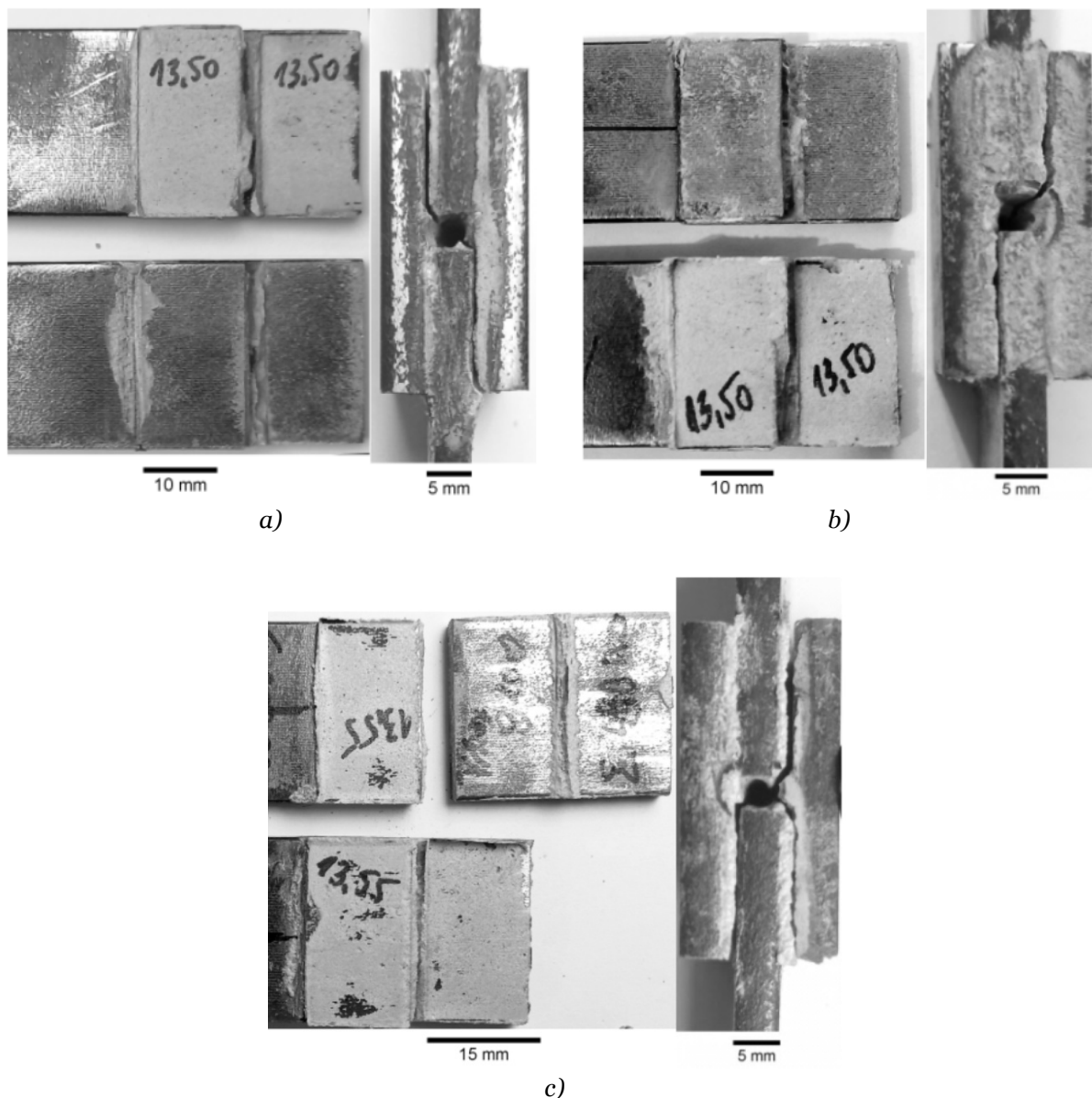
Pierwszą serię testów zmęczeniowych przeprowadzono dla próbek z nakładkami stalowymi (próbki 2-10). Oczekowaną liczbę cykli zmęczeniowych (powyżej 3×10^5 cykli) osiągnięto dla naprężeń zmęczeniowych poniżej 12MPa. Trwałość zmęczeniowa próbki poddanej naprężeniu zmęczeniowemu $\tau_{max,FAT}=11,96\text{MPa}$ wyniosła $N_f=489\,873$ cykli. Uzyskany wynik odpowiada 48,3% statycznej wytrzymałości na rozciąganie. Próbka poddana naprężeniu zmęczeniowemu $\tau_{max,FAT}=10,4\text{MPa}$ nie uległa zniszczeniu przy $1,1 \times 10^6$ cykli – stanowi to 42% wartości wytrzymałości statycznej na ścinanie.



Rysunek 3.13. Wyniki testów zmęczeniowych dla próbek typu DLJ dla R=0,1.

W oparciu o przeprowadzoną serię testów dla próbek nakładkami stalowymi zdecydowano się na badania trwałości zmęczeniowej próbek o niższej sztywności. Do testów użyto próbek (nr 12-15) z nakładkami kompozytowymi S&P 150/2000. Dla tego przypadku celem badań było uzyskanie wyników pozwalających na określenie granicy wytrzymałości zmęczeniowej – zatem w zakresie zainteresowań pozostawał przedział $3 \times 10^5 - 10^6$ cykli. Próbki poddane maksymalnym naprężeniom zmęczeniowym $\tau_{max,FAT} = 7,51 \text{ MPa}$ i $\tau_{max,FAT} = 6,01 \text{ MPa}$ nie zostały zerwane w zakresie do miliona przepracowanych cykli. Wybrane obciążenia stanowiły odpowiednio 30% i 24% wytrzymałości doraźnej. Dla wyższych obciążeń $\tau_{max,FAT}$ tj.: 10,36 MPa i 11,03 MPa uzyskano odpowiednio wyniki $N_f = 371\ 000$ cykli, oraz $N_f = 383\ 000$ cykli. Przyjęte poziomy obciążenia stanowiły odpowiednio 42% i 45% wytrzymałości doraźnej.

Dla pierwszej i drugiej serii próbek można zidentyfikować typowe formy zniszczenia złącza typu DLJ. Zostały one zaprezentowane odpowiednio dla próbek z nakładkami stalowymi na **rys. 3.14.**, a dla próbek z nakładkami kompozytowymi na **rys. 3.15.** W przypadku próbek z nakładkami stalowymi (**rys. 3.14.**) większość form zniszczenia przebiegała po przeciwległych stronach połączenia. Zniszczenia miały charakter adhezyjny i występowały po stronie rdzenia lub nakładki. Można było zaobserwować niewielkie obszary wykruszenia kleju z zerwanej powierzchni (ubytki powstałe najprawdopodobniej pod wpływem wielokrotnych obciążeń). Z kolei dla



Rysunek 3.14. Formy uszkodzeń próbek z nakładkami stalowymi dla maksymalnych naprężeń ścinających: a) $\tau_{max,FAT}=18.35MPa$; b) $\tau_{max,FAT}=13.48MPa$; c) $\tau_{max,FAT}=11.96MPa$.

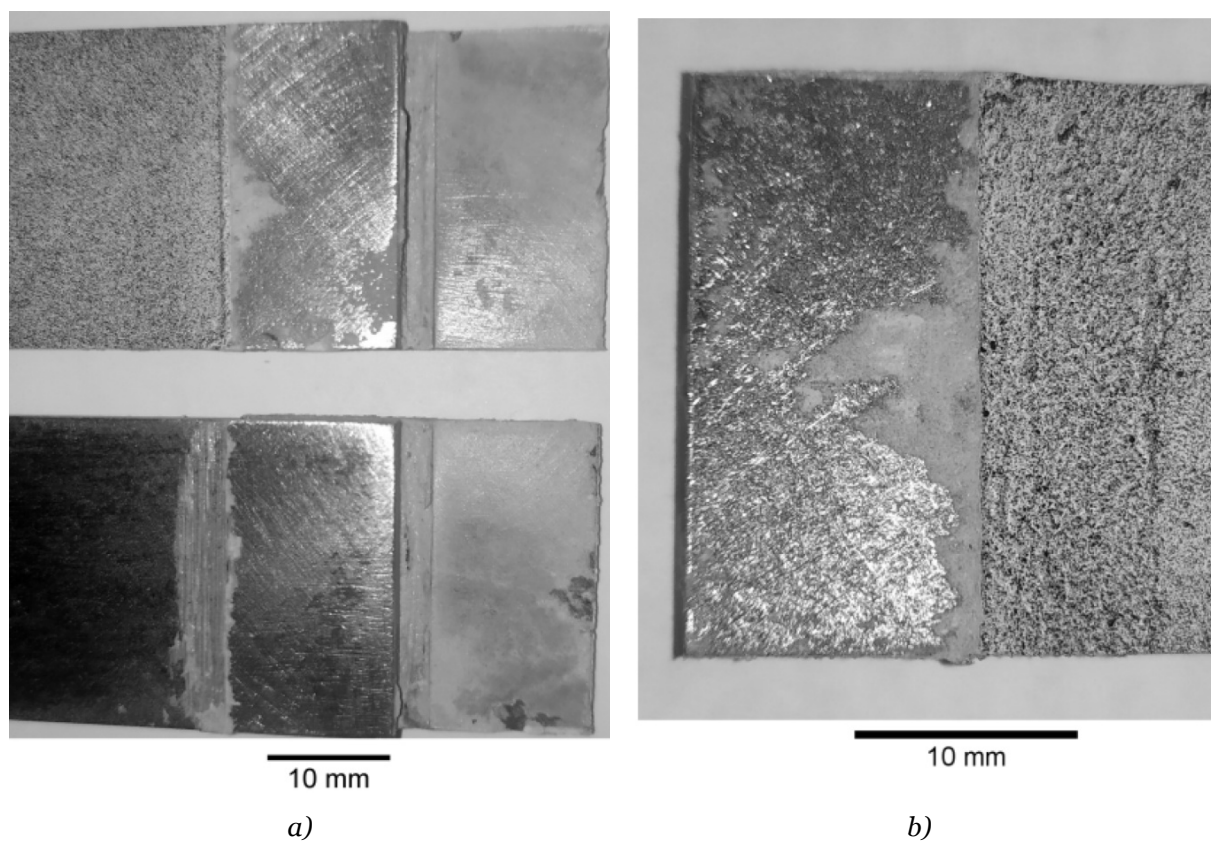
próbek z nakładkami kompozytowymi (**rys. 3.15.**) można zaobserwować charakterystyczny mechanizm polegający na ścinaniu połączenia klejowego na powierzchni stalowego rdzenia. W każdym z przypadków spoiwo pozostawało na nakładce kompozytowej. Świadczyć może to o potwierdzeniu działania wyższych naprężeń ścinających i odrywających dla tych przypadków, gdzie sztywność nakładek jest dużo niższa od sztywności rdzenia – co potwierdza **rys. 3.11.a,b**. Według wzoru (3.2) istnieje możliwość określenia różnic sztywności dla różnych materiałów nakładek (κ_2) i rdzenia (κ_1). Obliczenia sztywności zostały przedstawione w **tab. 3.1**. Różnicę sztywności określono na podstawie wzoru (3.13):

$$\Delta\kappa = \kappa_2 - \kappa_1 \quad (3.13)$$

Tabela 3.1. Wartości wskazanych sztywności próbek typu DLJ.

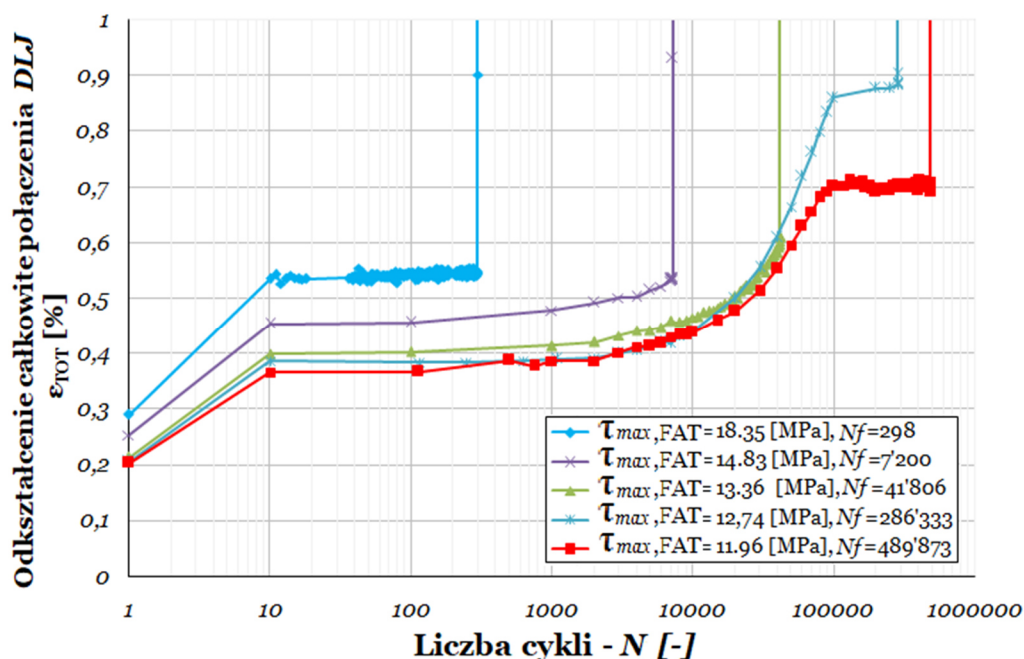
Oznaczenia	E [GPa]	t [mm]	κ_1 [kN/mm]	κ_2 [kN/mm]	$\Delta\kappa$ [kN/mm]
PRÓBKA TYPU DLJ: STAL-STAL					
Rdzeń: S355J2+N	210	4	840	-	840
Nakładka: S355J2+N	210	4	-	1680	
PRÓBKA TYPU DLJ: STAL-KOMPOZYT					
Rdzeń: S355J2+N	210	4	840	-	- 378
Nakładka: S&P 150/2000	165	1.4	-	462	

Dla połączenia DLJ stal-stal wykazano różnicę $\Delta\kappa=840\text{kN/mm}$ po stronie nakładek, natomiast dla próbek stal-kompozyt różnicę $\Delta\kappa= -378\text{kN/mm}$ po stronie rdzenia.



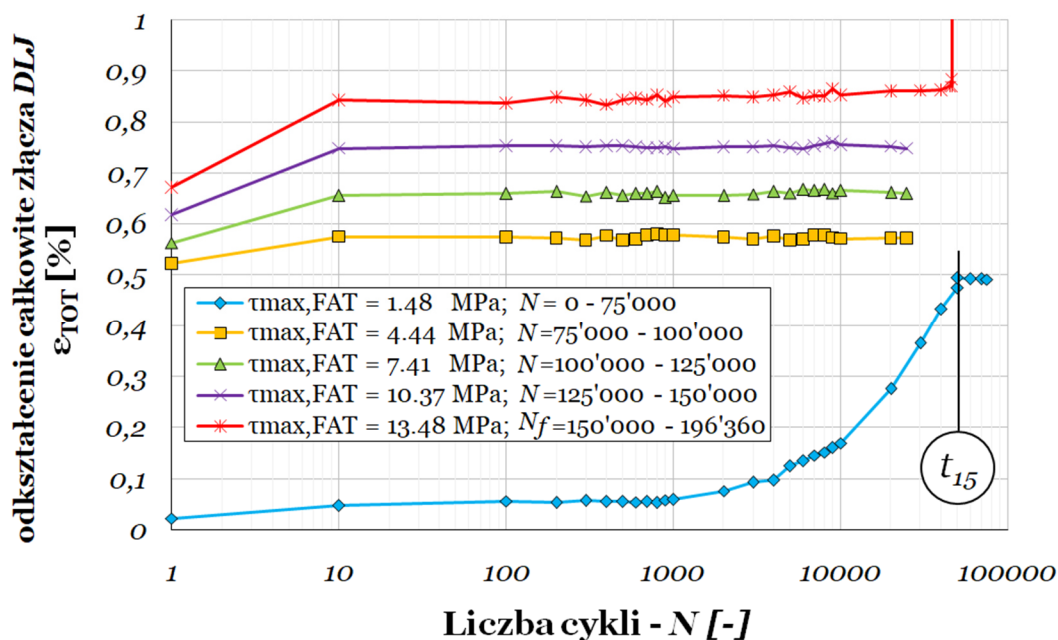
Rysunek 3.15. Formy zniszczenia próbek z nakładkami kompozytowymi S&P 150/2000 dla maksymalnych naprężeń ścinających: a) $\tau_{\max, \text{FAT}}=11.03 \text{ MPa}$; b) $\tau_{\max, \text{FAT}}=10.36 \text{ MPa}$.

Dla pierwszej serii badań przeanalizowano wybrane przypadki pod kątem przyrostu odkształcenia w funkcji liczby cykli. Wyniki zostały przedstawione na rys. 3.16.



Rysunek 3.16. Przyrost odkształcenia ε_{TOT} w funkcji zadanej liczby cykli N dla próbek typu DLJ stal-stal.

W trakcie badania próbek DLJ zaobserwowano zjawisko pełzania kleju. W celu oceny wpływu tego zjawiska na trwałość zmęczeniową wykonano dodatkowy test dla próbki oznaczonej numerem 16. Test ten został przeprowadzony przy stałym współczynniku asymetrii cyklu $R=0.1$, a w trakcie testu skokowo zwiększano obciążenie zmęczeniowe $\tau_{max, FAT}$ od wartości 1.48MPa do 13,48MPa - rys. 3.17.



Rysunek 3.17. Wykres $\varepsilon_{TOT} - N$ dla próbki nr 16 typu DLJ z stalowymi nakładkami. Badanie zrealizowane z narastającymi naprężeniami obciążającymi $\tau_{max, FAT}$.

Pierwsze zadane obciążenie zmęczeniowe wyniosło $\tau_{max,FAT}=1,48\text{MPa}$. Test ten składał się z trzech etapów – zmęczeniowego (50 000 cykli), zatrzymanie testu na 15 minut z utrzymanym napięciem próbki z siłą odpowiadającą naprężeniu średniemu cyklu $\tau_{m,FAT}=0,82\text{MPa}$ (oznaczenie t_{15} na **rys. 3.17**), oraz wznowienie testu zmęczeniowego z $\tau_{max,FAT}=1,48\text{MPa}$ (25 000 cykli). W trakcie przerwy przyrost odkształcenia pomiędzy czasem zatrzymania a czasem wznowienia badania wyniósł $\Delta\varepsilon_{TOT}=0,06\%$. Po wznowieniu badania nastąpiła stabilizacja i brak przyrostu dalszych odkształceń dla wskazanego obciążenia zmęczeniowego ($\tau_{max,FAT}=1,48\text{MPa}$) do momentu przepracowanej sumarycznej liczby cykli równej $N=75\ 000$. Efekty związane ze zjawiskami pełzania wystąpiły więc tylko w początkowej fazie pierwszego cyklu obciążenia.

W kolejnych seriach badawczych obciążenie zmęczeniowe $\tau_{max,FAT}$ przyjmowało odpowiednio wartości: 4,44MPa, 7,41MPa, 10,37MPa, a liczba przepracowanych cykli dla każdego z nich była równa $N=25\ 000$. Niewielkie przyrosty odkształceń widoczne są tylko dla pierwszych cykli i wynikają ze zwiększenia obciążenia maksymalnego próbki. W piątej serii zadano obciążenie zmęczeniowe $\tau_{max,FAT}=13,48\text{MPa}$, a próbka zniszczyła się po $N_f=46\ 360$ cyklach. W końcowej fazie zniszczenie połączenia *DLJ* następuje nagle nie wykazując żadnych odkształceń spoiwa. W sumie dla wszystkich poziomów obciążenia próbka przepracowała $N_f=196\ 360$ cykli.

Porównując uzyskany wynik dla próbki obciążanej etapowo aż do $\tau_{max,FAT}=13,48\text{MPa}$ z **rys. 3.17**. z obciążeniem $\tau_{max,FAT}=13,36\text{MPa}$ z **rys. 3.16** można zauważyć niewielką różnicę w zadanej liczbie cykli wynoszącej $\Delta N_f=4\ 554$ (na korzyść wyższego naprężenia) do momentu zniszczenia. Można więc wnioskować, że cykle zmęczeniowe, dla których $\tau_{max,FAT}\leq 10,4\text{MPa}$ (są to obciążenia dla którego uzyskano trwałość zmęczeniową powyżej 10^6 cykli) nie wpłynęły znacząco na skrócenie trwałości zmęczeniowej.

Zauważono również, że charakterystyczną cechą spoiwa klejowego S&P Resin 220 jest to, że w początkowej fazie dochodzi do przyrostu odkształcenia w złączu klejowym *DLJ*. Zjawisko to występuje zarówno przy obciążeniach statycznych, quasi-statycznych jak również zmęczeniowych, nawet przy niewielkim poziomie naprężenia ścinającego w kleju. Natomiast, w związku z tym, że nie zaobserwowano zjawiska pełzania dla większych obciążeń zmęczeniowych można przyjąć, że nie zależy ono od poziomu obciążenia zmęczeniowego. Należy dodać, że zaobserwowany efekt nie jest tematem rozprawy doktorskiej i nie będzie szczegółowo badany w dalszej części rozprawy. Zagadnienie związane z przyrostem odkształcenia i relaksacją zostały dokładniej omówione w rozprawie doktorskiej M. Kozłowskiego [136].

4. Wpływ wzmocnienia na trwałość elementów konstrukcji z otworami

W rozdziale omówiono trwałość elementów konstrukcji z korbami. W głównym obszarze badań znajduje się wpływ działania karbu oraz możliwości redukcji spiętrzenia naprężeń (K_t), a także wydłużenia trwałości elementów (N_f). W tym celu zastosowano nakładki wzmacniające o różnych kształtach i rozmiarach. W poniższych podrozdziałach zostały omówione analizy dotyczące porównania elementów bez i z nakładkami.

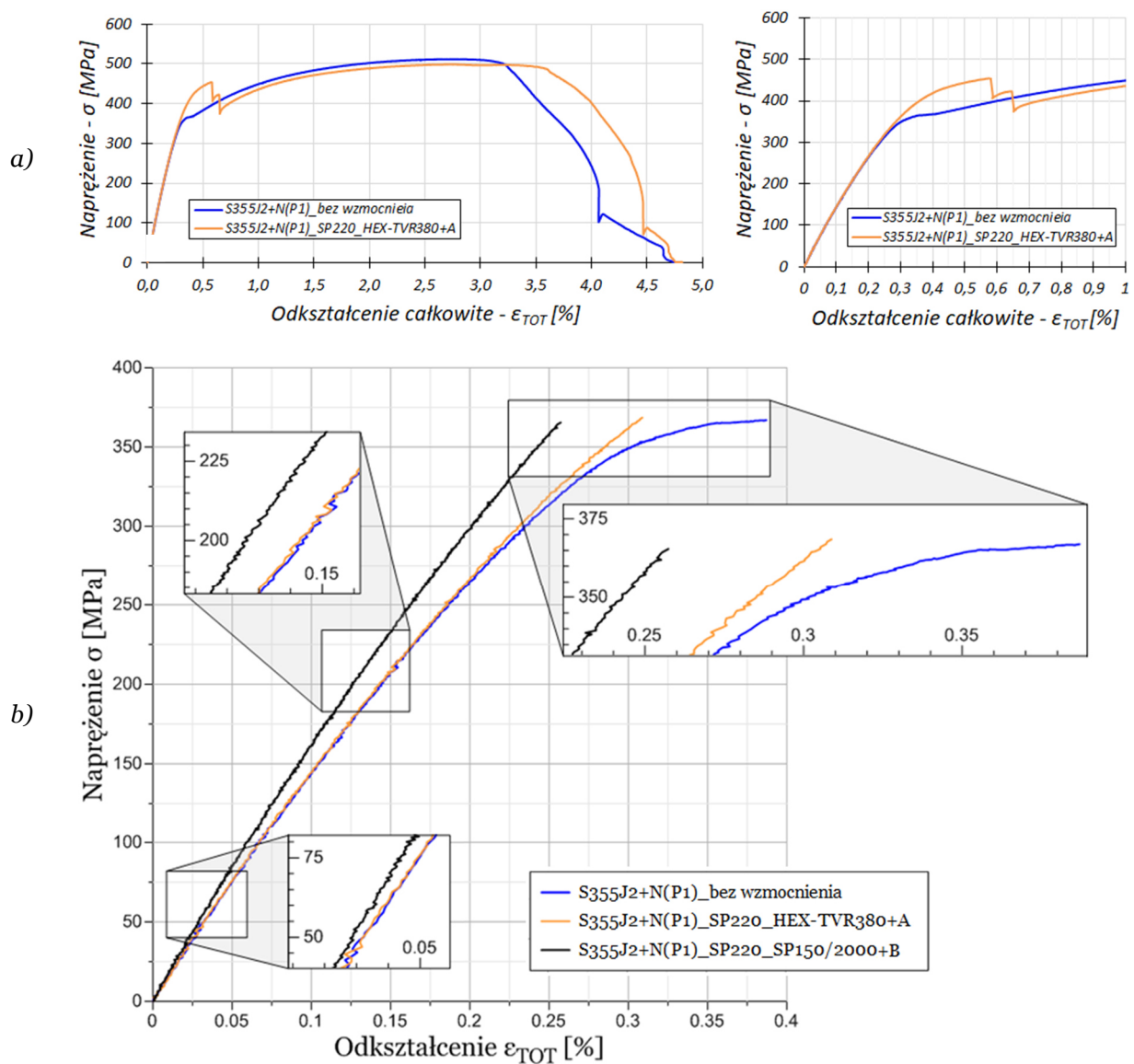
4.1. Wpływ wzmocnienia kompozytowego na trwałość oraz na charakter zmian obciążenia elementu konstrukcyjnego

W celu oceny wpływu zastosowania nakładek wzmacniających w konstrukcjach z korbami przeprowadzono statyczne testy rozciągania dla próbek z korbem w postaci otworu kwadratowego 15×15 z zaokrągleniem naroży R2. Próbki zostały wykonane ze stali S355J2+N(P1). Wstępne testy rozciągania wykonano dla próbki bez wzmocnienia oraz próbki z naklejonymi wzmocnieniami (wariant +A) w otoczeniu karbu. Wzmocnienie zostało wykonane z włókna szklanego Hexcel TVR380 R-glass (HEX-TVR380), obejmującego wycięty otwór. Wykresy σ - ϵ_{TOT} otrzymane z próby statycznego rozciągania wyżej wymienionych próbek zamieszczono na **rys. 4.1.a**. Przez naprężenie σ należy rozumieć naprężenie nominalne w stalowym rdzeniu w przekroju osłabionym otworem, bez uwzględnienia efektów związanych z koncentracjami naprężeń wokół korbów. Naprężenie to jest liczone w odniesieniu tylko do stalowego rdzenia (z pominięciem nakładek wzmacniających). Z punktu widzenia planowanych badań zmęczeniowych obszarem zainteresowań był zakres obciążeń, poniżej którego w próbce bez wzmocnienia naprężenie nominalne σ w osłabionym przekroju osiągało wartość odpowiadającą granicy plastyczności stalowego rdzenia. Obciążenie odpowiadające temu poziomowi naprężenia oznaczono jako F_{Ye} .

Dla próbki bez wzmocnienia otrzymano krzywą rozciągania odpowiadającą stali ciągliwej. W przypadku próbki ze wzmocnieniem +A można zauważyć dwa miejsca, w których doszło do oderwania nakładek od stalowego rdzenia ($\epsilon_{TOT} \approx 0,6$). Dla zastosowanego wzmocnienia +A nie zaobserwowano znaczących rozbieżności na krzywych rozciągania do wartości $\sigma = 300 \text{ MPa}$. Z tego względu zdecydowano się na zastosowanie wzmocnienia, w którym występują cztery prostokątne pasy wzmacniające o wymiarach $15 \times 180 \text{ mm}$ umieszczone symetrycznie po obu stronach próbki (wariant +B). Pasy zostały wykonane z włókna węglowego S&P C-Laminate 150/2000 (SP150/2000). Maksymalne obciążenie rozciągające próbkę w wariantcie +B ustalono tak, aby naprężenie nominalne σ w osłabionym otworem przekroju osiągnęło wartość odpowiadającą granicy plastyczności stalowego rdzenia nie wzmocnionej próbki (maksymalne obciążenie wynosiło F_{Ye}).

Porównanie wykresów rozciągania σ - ϵ_{TOT} do obciążenia F_{Ye} dla wspomnianych powyżej próbek zamieszczono na **rys. 4.1.b**. Dla naprężeń nominalnych σ powyżej

300MPa próbka bez wzmocnienia charakteryzuje się wyraźnym odkształceniem plastycznym. Można zauważyć, że w początkowej fazie obciążenia (50–75 MPa) zastosowana nakładka o kształcie kwadratu (+A) nie powoduje wyraźnej zmiany nachylenia krzywej przy rozciąganiu. W przypadku wzmocnienia (+B) prostokątnymi pasami w całym teście rozciągania widoczne jest wyraźne zwiększenie sztywności wzmocnionej próbki względem elementu bez wzmocnienia oraz próbki z nakładkami (+A). Porównując wykresy rozciągania próbek wzmocnionych z próbką bez wzmocnienia można zaobserwować wyraźne obniżenie efektów plastycznych w stalowym rdzeniu. Jest to szczególnie widoczne dla wyższych wartości naprężeń ($\sigma > 300$ MPa). Redukcja efektów plastycznych w rdzeniu (dla zakresu 300–375 MPa) spowodowana jest przejściem części obciążenia zewnętrznego przez nakładki wzmacniające. Największa zaobserwowana różnica odkształcenia ϵ_{TOT} wystąpiła pomiędzy próbką bez wzmocnienia, a wzmocnieniem (+B) i wyniosła $\Delta\epsilon_{TOT} = 0,131\%$. Zestawienie parametrów opisujących poszczególne próbki zamieszczono w **tab. 4.1**.



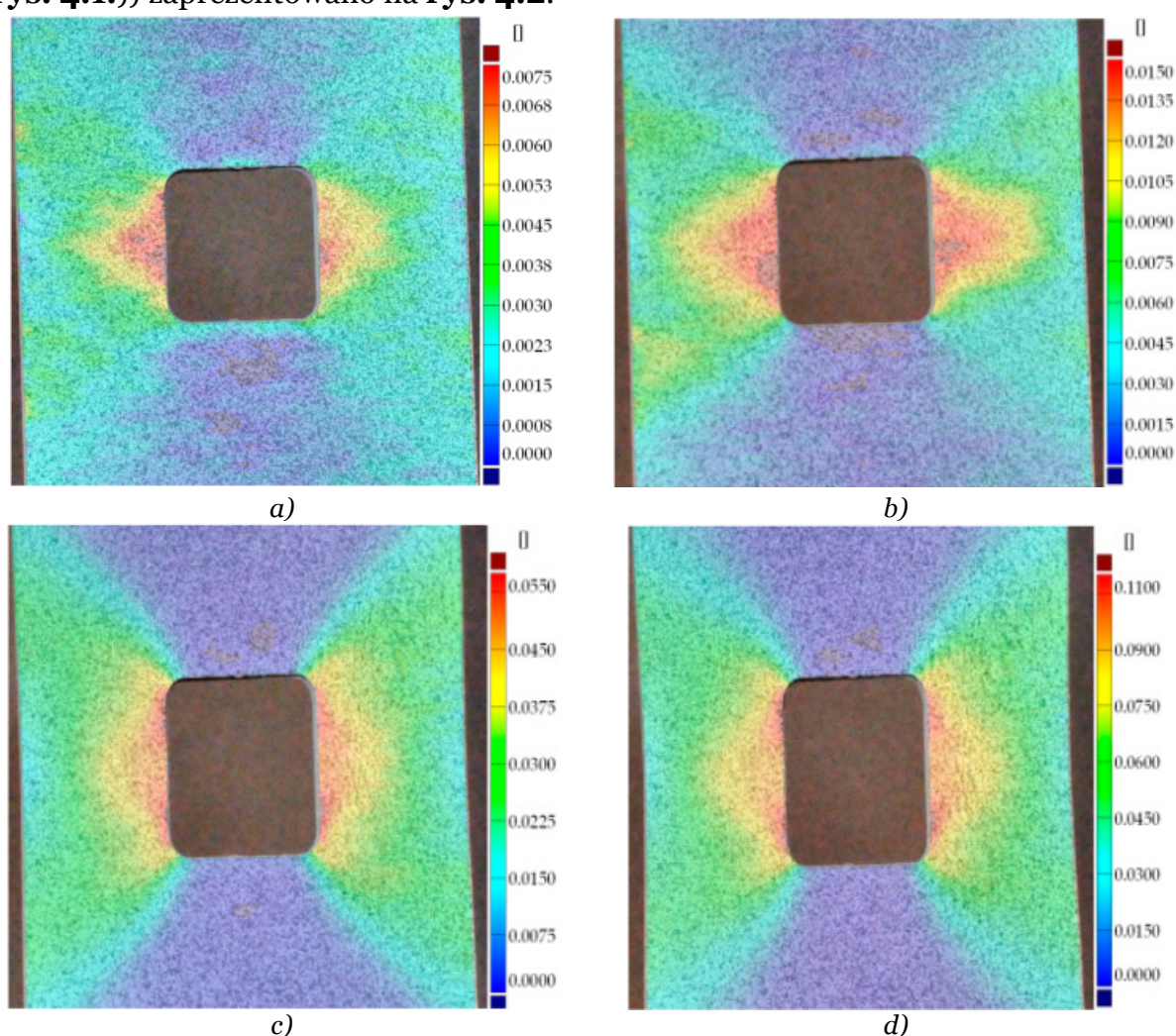
Rysunek 4.1. Wykresy rozciągania (σ - ϵ_{TOT}) dla: a) elementów z otworem bez wzmocnienia i ze wzmocnieniem +A; b) Porównanie krzywych rozciągania dla obciążenia F_{Ye} .

Tabela 4.1. Zestawienie wybranych wyników z prób rozciągania próbek (S355J2+N(P1)) z otworem $\square 15 \times 15$ bez i ze wzmocnieniem dla maksymalnego naprężenia rozciągającego (σ).

Oznaczenia	θ [°]	E_r [GPa]	E_n [GPa]	t [mm]	κ_1 [kN/mm]	κ_2 [kN/mm]	σ [MPa]	ϵ_{TOT} [%]
S355J2+N(P2)_bez wzmocnienia	-	210	-	4	840	-		0.387
S355J2+N(P2)_SP220_HEX- <i>TVR380</i> +A	[+45/-45] _{4N}	210	46.43	2	840	186	F_{Ye}^*	0.309
S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B	[0]	210	165	1.4	840	462		0.256

* F_{Ye} =365 MPa – obciążenie odpowiadające granicy plastyczności stali – **tab. 2.2.**

Bardziej szczegółową analizę mechanizmów zachodzących w trakcie rozciągania próbek – w otoczeniu karbów – wykonano za pomocą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Testy zostały wykonane dla próbek S355J2+N(P1) bez nakładek, z nakładką (+A) $\square 45 \times 45$ wykonaną z włókna szklanego HEXCEL TVR380 R-glass, a także wzmocnieniem (+B) wokół karbu czterema pasami 15×180 z włókna węglowego S&P 150/2000. Zmiany odkształcenia wokół karbu oraz rozwój stref plastycznych w próbce S355J2+N(P1) bez wzmocnienia (w odniesieniu do krzywych rozciągania (**rys. 4.1.**)) zaprezentowano na **rys. 4.2.**

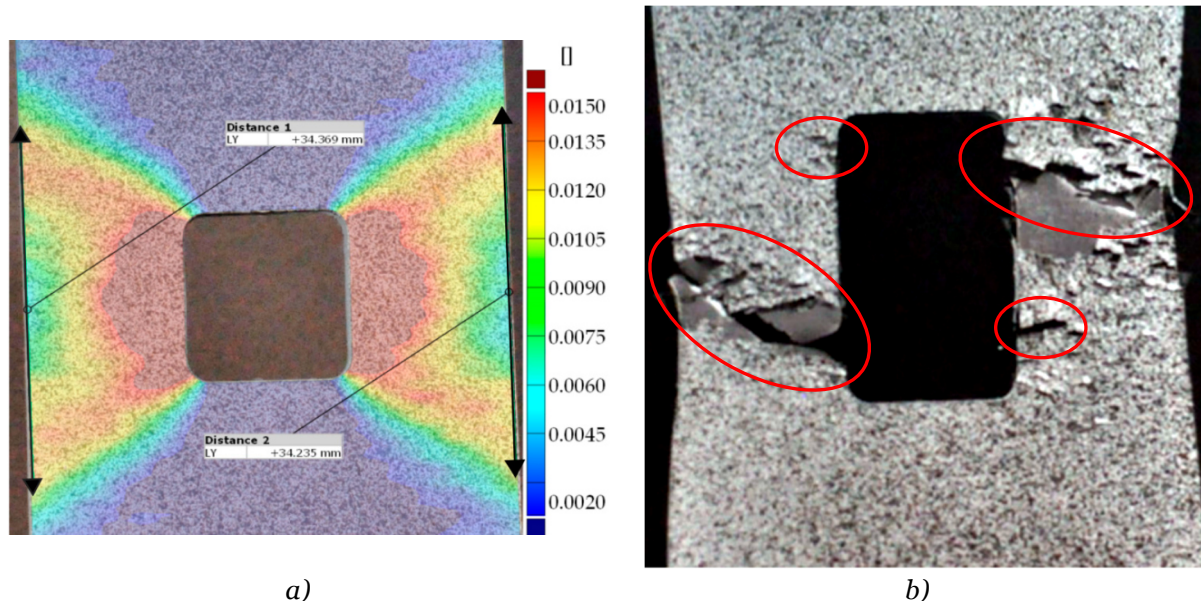


Rysunek 4.2. Rozkład odkształceń lokalnych dla próbki S355J2+N(P1)_bez wzmocnienia dla:

- a) $\epsilon_{x,local,max}=0.75\%$, $\epsilon_{TOT}=0.3\%$; b) $\epsilon_{x,local,max}=1.50\%$, $\epsilon_{TOT}=0.37\%$;
c) $\epsilon_{x,local,max}=5.50\%$, $\epsilon_{TOT}=0.85\%$; d) $\epsilon_{x,local,max}=11.00\%$, $\epsilon_{TOT}=1.48\%$.

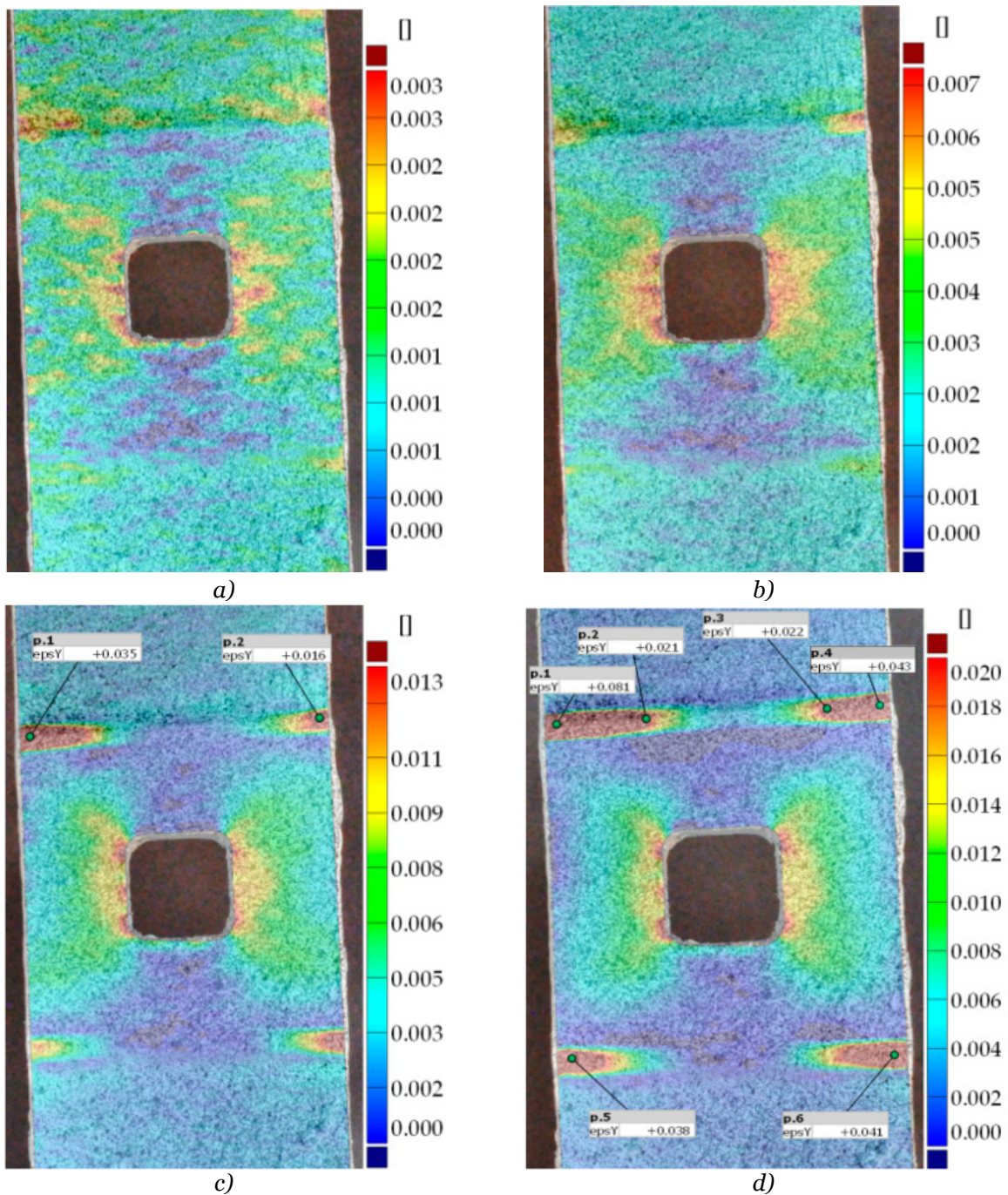
Zaprezentowana analiza wskazuje koncentracje naprężeń w miejscu zaokrąglenia naroży otworu. Można zaobserwować wyraźne strefy odkształceń i ich rozwój wokół korbów wraz ze wzrostem obciążenia. Na **rys. 4.2.a** zaprezentowano odkształcenie elementu przed obciążeniem stanowiącym granicę plastyczności (Y_{eH}) stali. W pobliżu miejsca zaokrąglenia naroży otworu można zaobserwować wyraźne odkształcenia ($\epsilon_{x,local,max}=0,75\%$) spowodowane koncentracjami naprężeń.

Na **rys. 4.2.b,c,d** zamieszczono rozkłady odkształceń dla obciążeń powyżej F_{Ye} (odpowiada to uplastycznieniu na wskroś osłabionego otworem przekroju). Wzrost obciążenia skutkuje rozwojem stref plastycznych oraz wzrostem odkształceń w korbach. Znaczny wzrost odkształceń obserwowany jest po obu stronach otworu, a jego obszar przyjmuje kształt zbliżony do trapezu (**rys. 4.3.a**). Są to strefy, które w szczególności wymagają wzmocnienia za pomocą nakładek. Strefy znajdujące się bezpośrednio nad i pod otworem są natomiast wyraźnie mniej obciążone. Formę zniszczenia elementu przedstawiono na **rys. 4.3.b**. Na skutek wysokiej ciągliwości stali, kształt otworu ulega wyraźnej zmianie, a pęknięcia inicjują się we wszystkich czterech narożach otworu (miejsca pęknięć zaznaczono na **rys. 4.3.b**). Punkty inicjacji pęknięć pokrywają się z położeniem ekstremalnych odkształceń wyznaczonych za pomocą *DIC* (**rys. 4.2.c,d**). Powstałe pęknięcia propagowały pod kątem 45° stopni względem kierunku działania siły rozciągającej.



Rysunek 4.3. Próbką S355J2+N(P1)_bez wzmocnienia z otworem kwadratowym 15×15 z zaokrągleniem naroży R2: a) mapa odkształceń prezentująca obszar największych wartości odkształceń o kształcie trapezu; b) forma zniszczenia próbki.

Wyniki analizy *DIC* dla próbki S355J2+N(P1)_SP220_HEX-TVR380+A (próbka wzmocniona za pomocą nakładek o kształcie kwadratu 45×45 z wyciętym otworem 15×15 z zaokrągleniem naroży R2; nakładki z włókna szklanego z materiału HEXCEL TVR380 R-glass) zaprezentowano na **rys. 4.4**. Na zamieszczonych warstwicach widoczne są odkształcenia na powierzchni rdzenia (na obu końcach próbki) i nakładki kompozytowej. Zaobserwowano dwa miejsca, w których wystąpiły



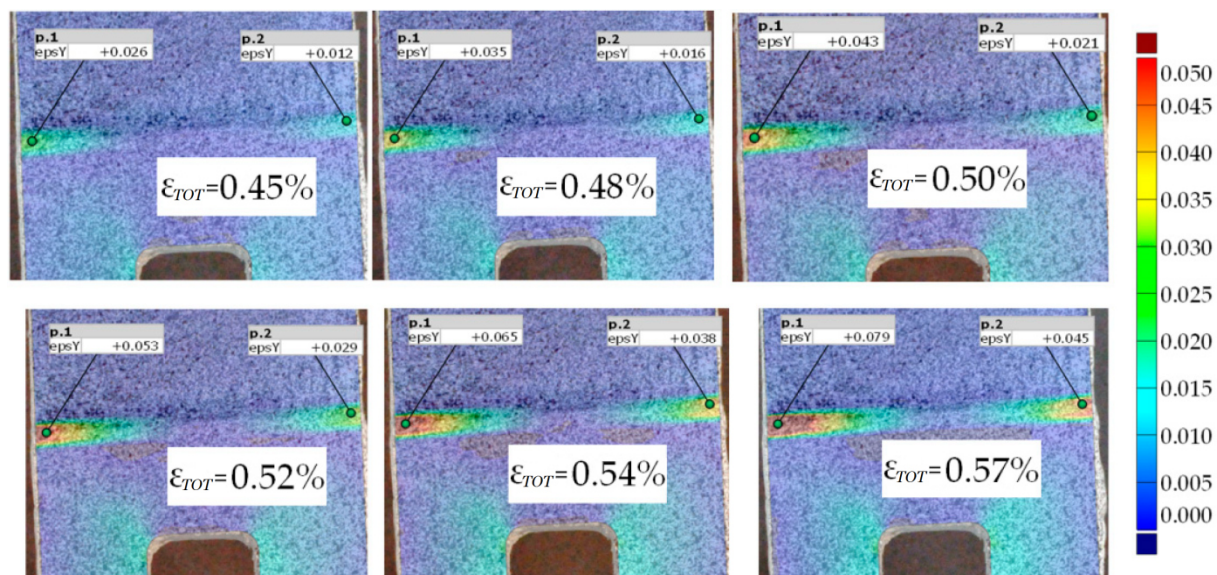
Rysunek 4.4. Rozkład odkształceń lokalnych dla próbki S355J2+N(P1)_SP220_HEX-TVR380+A:
 a) $\epsilon_{x,local,max}=0.30\%$, $\epsilon_{TOT}=0.22\%$; b) $\epsilon_{x,local,max}=0.70\%$, $\epsilon_{TOT}=0.37\%$;
 c) $\epsilon_{x,local,max}=1.30\%$, $\epsilon_{TOT}=0.48\%$; d) $\epsilon_{x,local,max}=2.00\%$, $\epsilon_{TOT}=0.57\%$.

lokalne koncentracje odkształceń – w okolicy korbów na nakładce i w miejscu zakończenia nakładek (w kleju). Wykonana analiza dla obciążenia poniżej F_{Ye} (rys. 4.4.a) wykazała, że nakładki odciążają stalowy rdzeń, a lokalne koncentracje odkształceń pojawiają się w miejscach odpowiadających koncentracjom naprężeń w stalowym rdzeniu (porównanie rys. 4.2.a z rys. 4.4.a). Zwiększanie obciążenia powyżej F_{Ye} prowadzi zarówno do zwiększenia obciążenia nakładki jak również do wzrostu koncentracji odkształceń na nakładce w okolicach korbów. Podobnie jak w przypadku próbki bez nakładek (rys. 4.2.), wyróżnić tutaj można strefy wyraźnie mniej odciążone (rys. 4.4.) znajdujące się nad i pod otworem kwadratowym.

Obecność tych stref wynika z zaburzonego przebiegu linii sił wewnętrznych w stalowym rdzeniu i nakładce wzmacniającej. Należy mieć świadomość, że może to istotnie wpływać na nierównomierne obciążenie kleju łączącego nakładki do stalowego rdzenia.

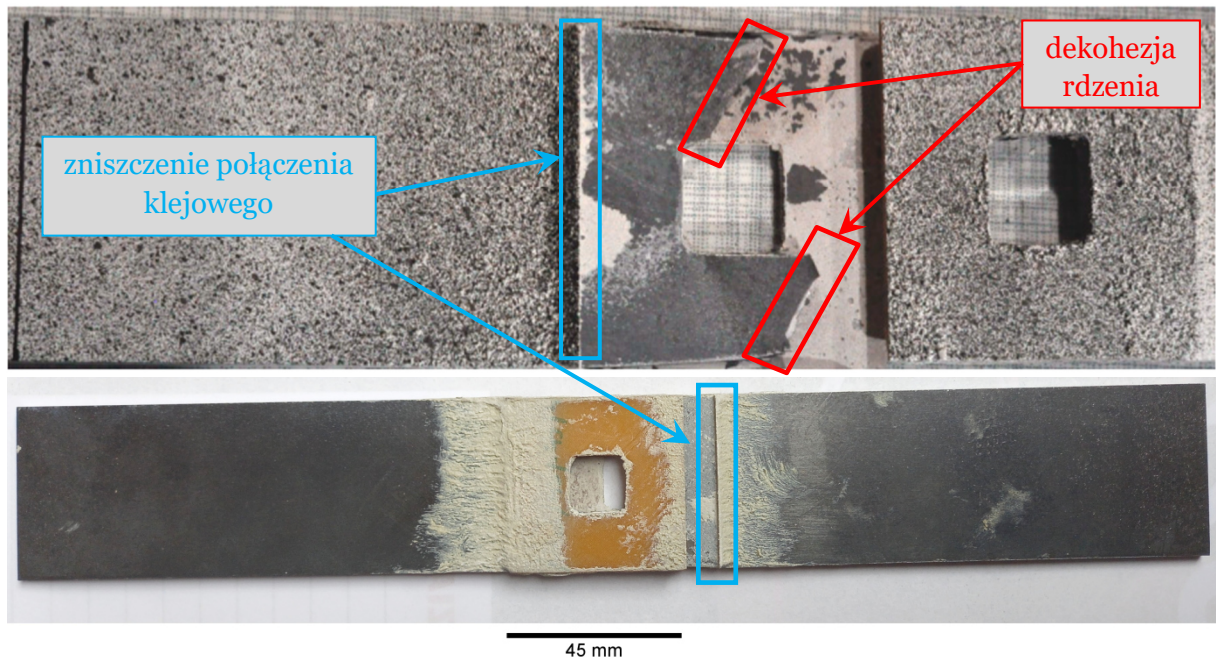
Znacznie większe odkształcenia wystąpiły w kleju. Porównując wyniki analizy DIC z **rys. 4.4.** z wynikami zamieszczonymi na **rys. 3.8.** można zauważyć wyraźne różnice w obciążeniu połączenia. Różnice te związane są z powstaniem znacznych odkształceń na końcach spoiwa oraz wyraźnym odciążeniem środkowej części połączenia klejowego. Odkształcenia te zaczynają być wyraźnie widoczne na **rys. 4.4.c** w okolicach wszystkich czterech naroży nakładki wzmacniającej. Dalszy wzrost obciążenia (**rys. 4.4.d**) powoduje wzrost odkształcenia warstwy kleju pod nakładką, co skutkuje nierównomiernym obciążeniem zakończenia spoin klejowych na obu końcach nakładki. W konsekwencji (**rys. 4.4.d**) prowadzi to do znacznego wzrostu odkształceń w narożach fazy klejowej i jej pęknięcia (w strefie między krawędzią nakładki a rdzeniem – **rys 4.5.**). Może to świadczyć o pojawianiu się silnych naprężeń odrywających i/lub koncentracji naprężeń ścinających na zakończeniu spoiny. Na pozostałych mapach odkształceń (**rys. 4.4.b,c,d**) można zauważyć rozwój lokalnych odkształceń. Rozwój odkształceń w nakładce zbliżony jest do wyników otrzymanych dla próbki bez wzmocnienia (**rys. 4.3.a**). Potwierdza to prawidłową pracę nakładki w odciążeniu rdzenia.

Pierwszą zarejestrowaną formą uszkodzenia połączenia jest zniszczenia połączenia klejowego. Rozwój odkształceń lokalnych na zakończeniu spoiny klejowej względem odkształcenia całej próbki został zaprezentowany na **rys. 4.5.**



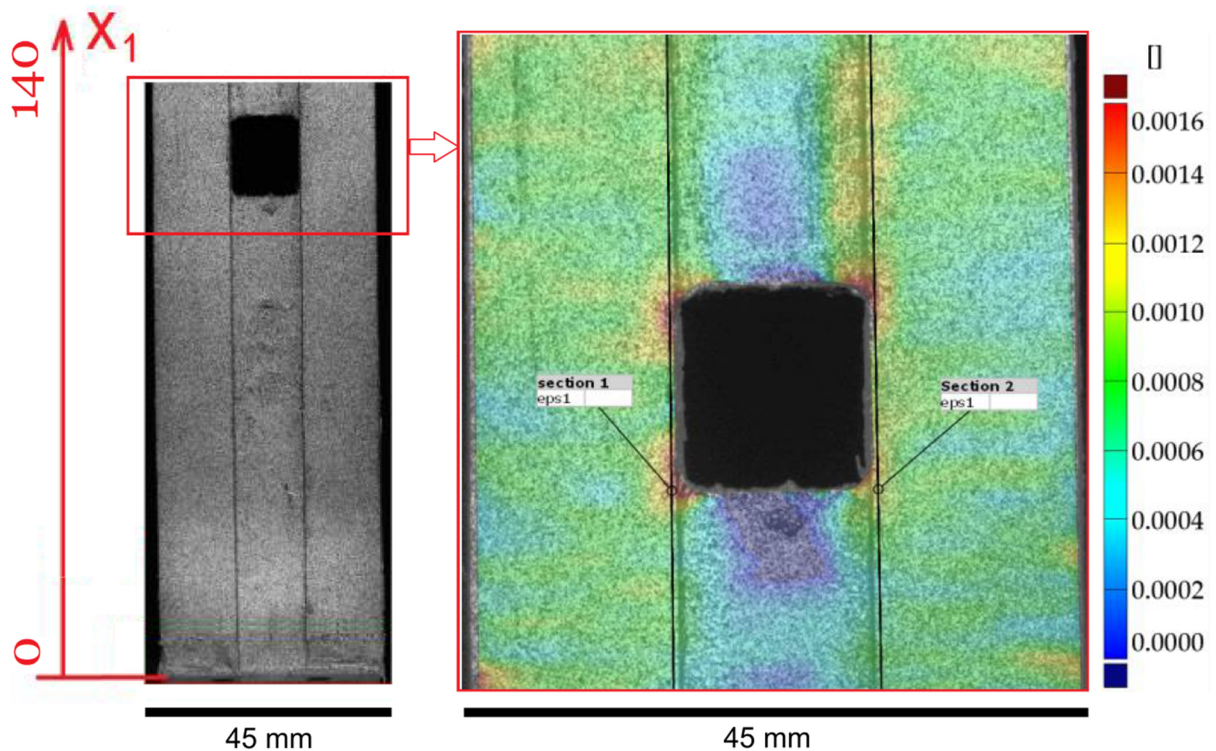
Rysunek 4.5. Rozwój odkształcenia lokalnego na spoinie klejowej wraz z wzrostem całkowitego wydłużenia próbki (ϵ_{TOT}) S355J2+N(P1)_SP220_HEX-TV380+A.

Forma zniszczenia próbki została przedstawiona na **rys. 4.6.** Zniszczenie nastąpiło przez obustronne odklejenie w miejscu zakończenia spoiny. Nakładki posiadały zdegradowaną powierzchniową warstwę od strony spoiny.



Rysunek 4.6. Forma zniszczenia próbki S355J2+N(P1)_SP220_HEX-TV380+A: kolor niebieski zniszczenie połączenia klejowego; kolor czerwony dekohezja rdzenia.

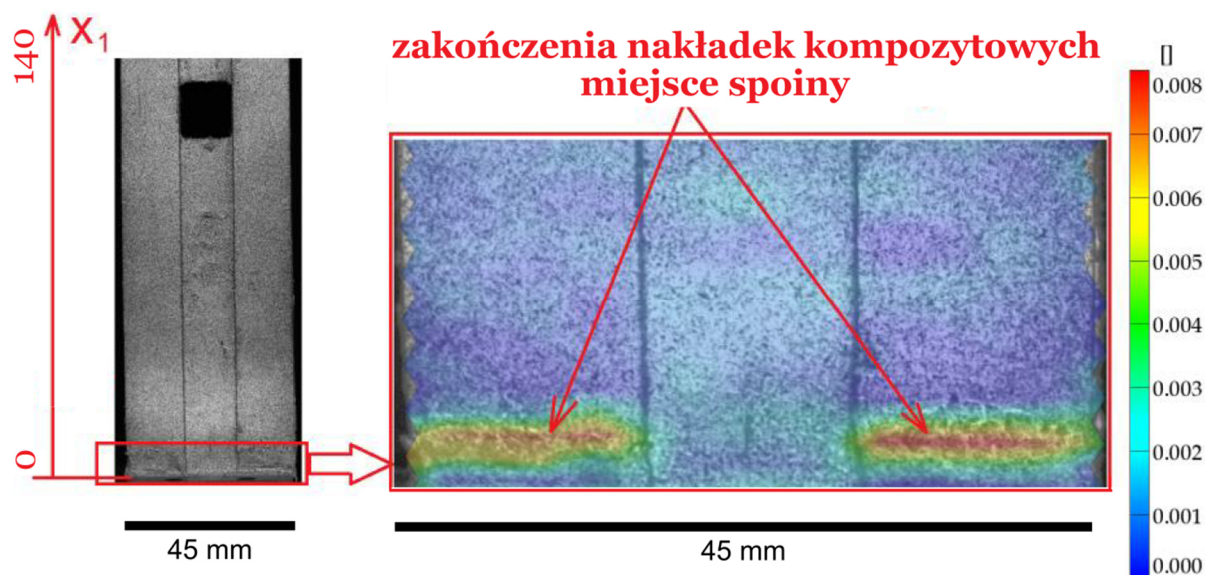
Mapa odkształceń dla próbki ze wzmocnieniem +B (wzmocnienie za pomocą czterech prostokątnych pasów wzmacniających wykonanych z jednokierunkowego ciągłego włókna węglowego S&P C-Laminate 150/2000 naklejonych po obu stronach otworu równoległe do kierunku obciążenia – próbka S355J2+N(P1)_SP220_SP150/2000+B została przedstawiona na **rys. 4.7**.



Rysunek 4.7. Mapa i wykres odkształceń wokół wzmocnienia dla prostokątnych pasów kompozytowych 15×180 aplikowanych wokół otworu próbki S355J2+N(P1)_SP220_SP150/2000+B – odkształcenie całkowite próbki $\epsilon_{TOT}=0.256\%$.

Lokalny wzrost odkształceń pojawia się w okolicach zaokrąglenia naroży w zarówno na nakładkach kompozytowych jak również w rdzeniu. Osiągnięte w tych miejscach wartości odkształceń osiągają wartość ekstremalną (kolor bordowy) w pobliżu karbu. Na pozostałej części nakładek odkształcenia osiągają poziom około połowy wartości odkształceń zarejestrowanych w otoczeniu karbu. Pozwala to stwierdzić, że nakładka znacząco odciąża stalowy rdzeń. Podobnie jak w poprzednich przypadkach (**rys. 4.2.** i **rys. 4.4.**) bezpośrednio nad i pod otworem obserwuje się w lokalne odciążenie rdzenia spowodowane wpływem istniejącego karbu.

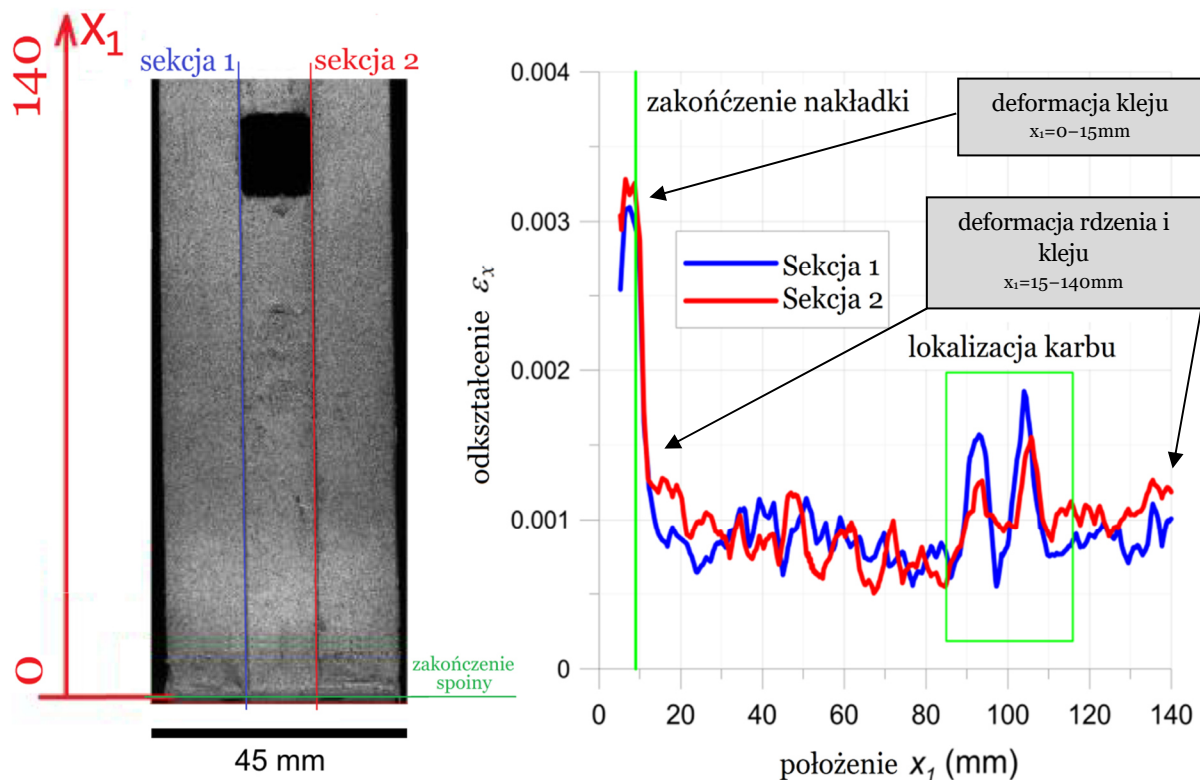
Rozkład odkształceń w zakończeniu spoiny przedstawiono na **rys. 4.8.** Na mapie odkształceń można zauważyć, że głównym miejscem wzrostu odkształcenia jest spoina klejowa. Jest to spowodowane dużo mniejszą wartością sztywności kleju (w porównaniu do sztywności stali i kompozytu). Dlatego też w połączenie klejowe wykazuje większą skłonność do odkształceń. Maksymalne wartości odkształceń w zakończeniu spoiny klejowej (**rys. 4.8.**) są około pięć razy większe niż zarejestrowane odkształcenia wokół otworu (**rys. 4.7.**). Podobny efekt wystąpił na zakończeniu spoiny klejowej w próbce z nakładką kwadratową (**rys. 4.5.**).



Rysunek 4.8. Mapa odkształceń na zakończeniach spoiny dla prostokątnych pasów kompozytowych 15×180 aplikowanych wokół otworu próbki S355J2+N(P1)_SP220_SP150/2000+B – odkształcenie całkowite próbki $\epsilon_{TOT}=0.256\%$.

Rozkład odkształceń zarejestrowany w pobliżu krawędzi nakładki wzdłuż jej długości od miejsca spoiny klejowej ($x=0$) do miejsca o współrzędnej $x=140$ (za otworem) dla sekcji 1 i sekcji 2 został zaprezentowany na **rys. 4.9.** Zaobserwowano dwa miejsca ze znacznymi lokalnymi spiętrzeniami odkształceń. Są to zakończenia spoin klejowych oraz otoczenie wyciętego otworu kwadratowego. Znacznie wyższe odkształcenia zauważono w miejscu zakończenia spoiny.

Podsumowując otrzymane wyniki wnioskuje się, że kluczowym miejscem decydującym o trwałości całej próbki jest połączenie klejowe, a w szczególności jego zakończenie.



Rysunek 4.9. Rozkład odkształceń wzdłuż sekcji 1 i 2 od miejsca zakończenia spoiny ($x=0$ mm) do miejsca za karbem ($x=140$ mm) – próbka S355J2+N(P1)_SP220_SP150/2000+B z czterema jednokierunkowymi pasami wzmacniającymi 15×180 z włókna węglowego S&P 150/2000.

Problem ten został szczegółowo rozważony na przykładzie połączenia DLJ (rys. 3.8.). Wykazano, że istnieje możliwość obniżenia wartości naprężeń odrywających poprzez odpowiednie uformowanie zakończenia spoiny [84]. Zarówno w przypadku złączy DLJ jak również próbek z karbami ze wzmocnieniami +A i +B, zniszczenie zapoczątkowane zostało pęknięciem w miejscu spoin klejowych. Rozdzielenie nakładki od stalowego rdzenia powoduje całkowite przeniesienie obciążeń przez stalowy rdzeń. Niestety przypadek stosowania wzmocnień w miejscach karbu jest dużo bardziej skomplikowany niż badanie trwałości złączy DLJ, dla którego możliwe znane jest rozwiązanie analityczne [94]. W przypadku próbek z karbem charakter zmian jest znacznie bardziej złożony, i w związku z tym znacznie trudniejsze jest określenie rzeczywistego teoretycznego rozkładu naprężeń ścinających w warstwie kleju jak również przewidzenie formy zniszczenia złączy.

4.2. Numeryczna weryfikacja wpływu kształtu nakładki na spiętrzenie naprężeń

W celu oszacowania wpływu nakładki na koncentrację naprężeń (K_t) w miejscu karbu wykorzystano metodę elementów skończonych. Wykorzystanie MES jest uzasadnione brakiem rozwiązania analitycznego dla analizowanego elementu z nakładkami pozwalającym na oszacowanie koncentracji naprężeń w badanym karbie. Dodatkowo nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru odkształceń na powierzchni rdzenia w miejscu karbu za pomocą DIC ze względu na położenie karbu „pod” nakładką wzmacniającą. Poprzez wykonanie analizy MES możliwe jest

numeryczne zweryfikowanie skuteczności wzmocnienia poprzez analizę wartości współczynnika kształtu (K_t) dla elementu bez nakładki i z nakładką o różnych kształtach. Współczynnik kształtu K_t w przypadku elementu z karbem bez nakładki można określić w oparciu o dostępne rozwiązania analityczne. Rozwiązania te są dostępne jako oszacowanie dla rozciąganej płyty o nieskończonej szerokości (1.9), a także z określoną, skończoną szerokością (4.1), dla której stosowane są wzory redukcyjne wg. [2,137,138,139]:

$$K_t = K_t^\infty \cdot C_w = [C_0 + C_1(f_1) + C_2(f_2)^2 + C_3(f_3)^3] \cdot C_w \quad (4.1)$$

gdzie poprzez K_t^∞ rozumie się współczynnik spiętrzenia naprężeń dla płyty z nieskończoną szerokością; a C_w oznacza stałą korekcyjną określoną dla danej szerokości płyty; C_0, C_1, C_2, C_3 są stałymi uzależnionymi od kształtu zaokrąglenia naroży otworu kwadratowego; f_1, f_2, f_3 są funkcjami zależnymi od wymiarów otworu prostokątnego. W **tab. 4.2.** zaprezentowano wyznaczony teoretyczny współczynnik K_t dla próbki z **rys. 2.2.a.**

Tabela 4.2. Wartość wyznaczonego spiętrzenia naprężeń K_t wraz z obliczonymi współczynnikami dla próbki o szerokości $W=45$ [mm], długości $L=300$ [mm], grubości $t=4$ [mm] z otworem $\square 15 \times 15$ z zaokrągleniem naroży R_2 .

	K_t	C_0	C_1	C_2	C_3	f_1	f_2	f_3	K_t^∞	C_w	Inne
$\square 15 \times 15, R_2$ (rys. 2.2a)	2.479	8.842	-13.676	12.847	-4.518	1	1	1	3.495	0.709	$R/b=2/15$ $b/w=1/3$

Odpowiednią analizę numeryczną można przeprowadzić na różnych poziomach aproksymacji. W ogólnym przypadku konstrukcję można uznać za obiekt 3D, co wymaga zastosowania bryłowych elementów skończonych 3D. Główną wadą takiego podejścia jest wielkość zadania numerycznego. Powodem tego jest konieczność zastosowania bardzo gęstej siatki w otoczeniu podcięć, aby precyzyjnie wyznaczyć efekt koncentracji naprężeń. Kompromisem jest zastosowanie dwuwymiarowych (2D) płaskich elementów skończonych, które są w pełni uzasadnione ze względu na małą – w porównaniu z pozostałymi wymiarami – grubość analizowanej płyty. Generalnie oprogramowanie ANSYS oferuje różne typy elementów skończonych, które można wykorzystać do analizy laminatów ortotropowych, warstwowych lub ich połączeń z materiałami izotropowymi. Wśród nich znajdują się dwa elementy powłokowe, dwuwarstwowe elementy bryłowe oraz warstwowe elementy konstrukcyjne 3D, co pozwala na analizę laminatów nawet o 250 niezależnie zdefiniowanych warstwach. Zasadnicza różnica pomiędzy powyższymi elementami polega na poziomie aproksymacji poszukiwanych przemieszczeń. W niniejszej pracy do obliczeń wykorzystano elementy powłokowe z liniową aproksymacją przemieszczeń (SHELL181). Taki wybór elementu skończonego podyktowany był stosunkiem grubości płyty do pozostałych jej wymiarów – grubość analizowanej struktury była kilkakrotnie mniejsza niż pozostały wymiar płyty – wzór (1.2).

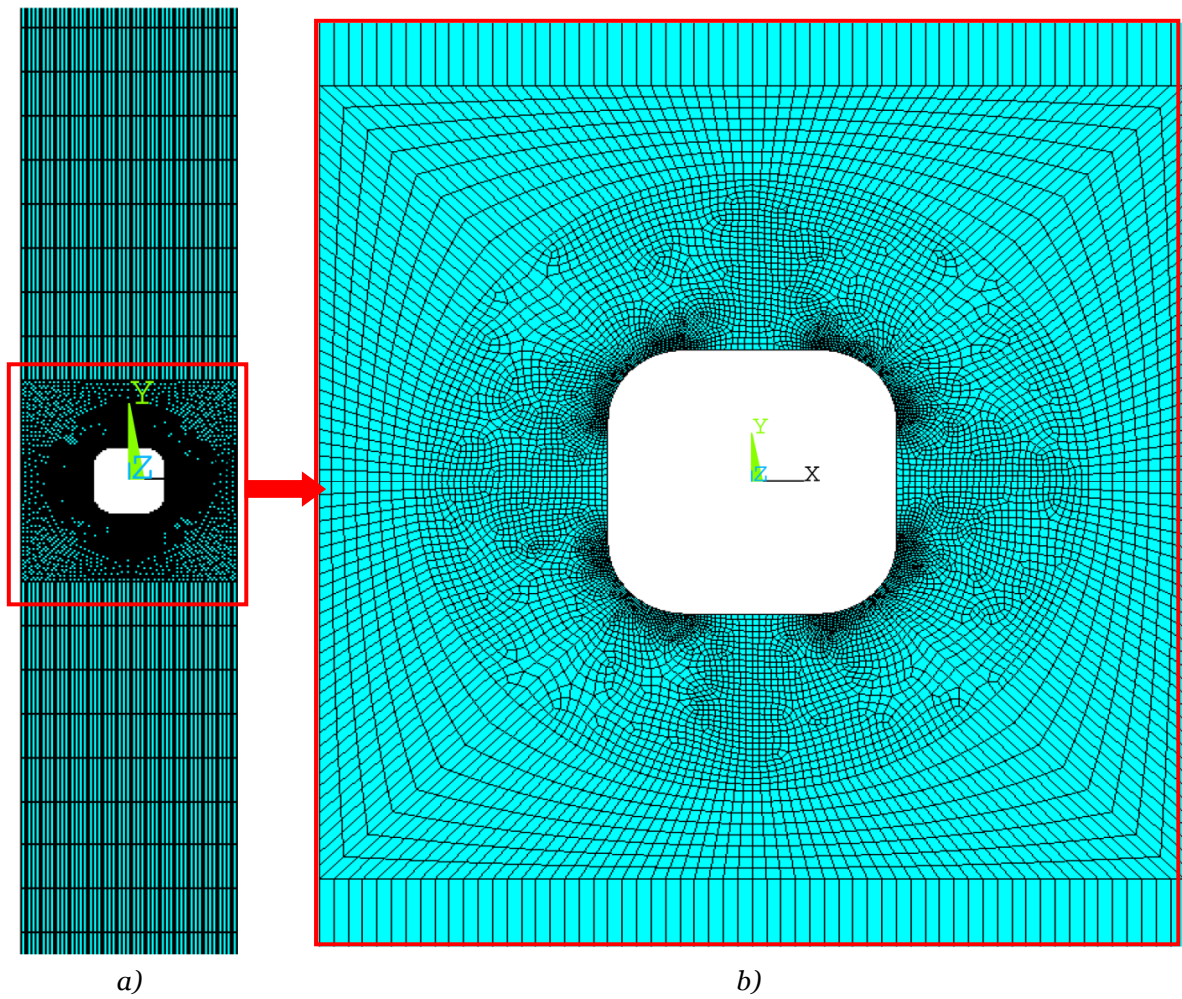
Szczegółowe obliczenia numeryczne przeprowadzono dla płaskich próbek z otworem kwadratowym z zaokrąglonymi narożami o promieniu R_2 (**rys. 2.2.**). Otrzymane wyniki porównano pomiędzy elementami bez i z nakładkami. W analizach uwzględniono kształty badanych eksperymentalnie próbek z nakładką kwadratową

i pasami wzmacniającymi. Przeprowadzono również analizę wzmocnienia w postaci nakładki kołowej o różnym promieniu. Ostatecznie, po ocenie efektywności zastosowania każdej z nakładek oraz z uwagi na koszt przygotowania, nakładka o kształcie kołowym nie została przebadana doświadczalnie.

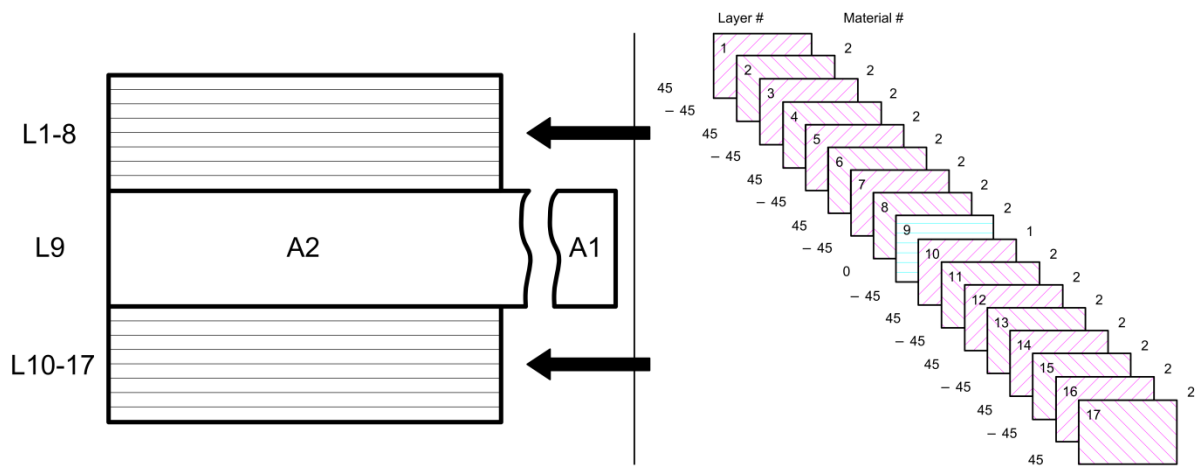
Dodatkowo przeprowadzono weryfikację spiętrzenia naprężeń w elemencie stalowym dla różnego kąta ułożenia włókien jednokierunkowych we wzmocnieniu. Wykorzystane w obliczeniach siatki elementów skończonych wykazywały wspólną cechę, która polegała na zastosowaniu stosunkowo gęstych siatek wokół podcięć i w ich sąsiedztwie. Pozwala to na uzyskanie dokładnego przybliżenia wartości odkształceń i naprężeń w karbach i ich bliskich strefach oraz zastosowanie siatek o raczej umiarkowanej gęstości w obszarach, które nie są głównym przedmiotem zainteresowania. Jakość zastosowanej aproksymacji jest kontrolowana przez badanie zbieżności rozwiązania, obserwację i ocenę przebiegu warstwic odkształceń lub naprężeń oraz kontrolę zgodności wyników w wybranych punktach położonych symetrycznie względem pionowego przekroju środkowego próbek. Dotyczy to oczywiście przypadków bez nakładek kompozytowych lub próbek z nakładkami o orientacji włókien $\theta=0^\circ$ lub $\theta=90^\circ$ w odniesieniu do kierunku rozciągania. W wymienionych wyżej przypadkach dodatkowo czas obliczeń można ograniczyć wykorzystując symetrię geometrii, warunków brzegowych i przyłożonego obciążenia zewnętrznego. Wówczas można analizować $\frac{1}{4}$ próbki. Schemat ten nie może być zastosowany przy innej, dowolnej orientacji włókien θ . Wówczas należy analizować model całej próbki. Przykładowe siatki elementów wygenerowane dla pełnego modelu płyty z kwadratowym otworem o zaokrąglonych narożach przedstawiono na **rys. 4.10**.

Szczegółowe obliczenia numeryczne wykonano dla kolejności ułożenia warstw zaprezentowanych na **rys. 4.11** dla materiału HEXCEL TVR 380 R-glass (**tab. 2.4.**). Warstwa 9 odpowiada płycie stalowej (rdzeń), natomiast warstwy od 1 do 8 i 10 do 17 to warstwy kompozytowe zbrojone włóknem długim, z odpowiednią orientacją kątową. Analizę MES wykonano dla płyty o długości $L=200$ mm, szerokości $W=45$ mm i grubości $t=4$ mm. Długość 200 mm jest długością czynnej części zamodelowanej pomiędzy uchwytami – w uchwytach znajduje się po 50 mm elementu. W elemencie zamodelowano otwór identyczny jak w próbkach badanych eksperymentalnie. (**rys. 2.2.**). Naprężenie nominalne w osłabionym przekroju było równe 8,33 MPa. Odpowiada to działaniu siły rozciągającej $F=1$ kN przyłożonej do dolnej krawędzi w kierunku pionowym – jest to forma obciążenia jednostkowego. Górna część próbki została utwierdzona. W pierwszym etapie obliczeń analizowano element bez nakładek, po to aby uzyskać rozwiązanie bazowe do porównań rozkładów naprężeń w elementach wzmocnionych. Na **rys. 4.12** przedstawiono wyniki obliczeń - rozkład naprężeń rozciągających w otoczeniu wyciętego otworu.

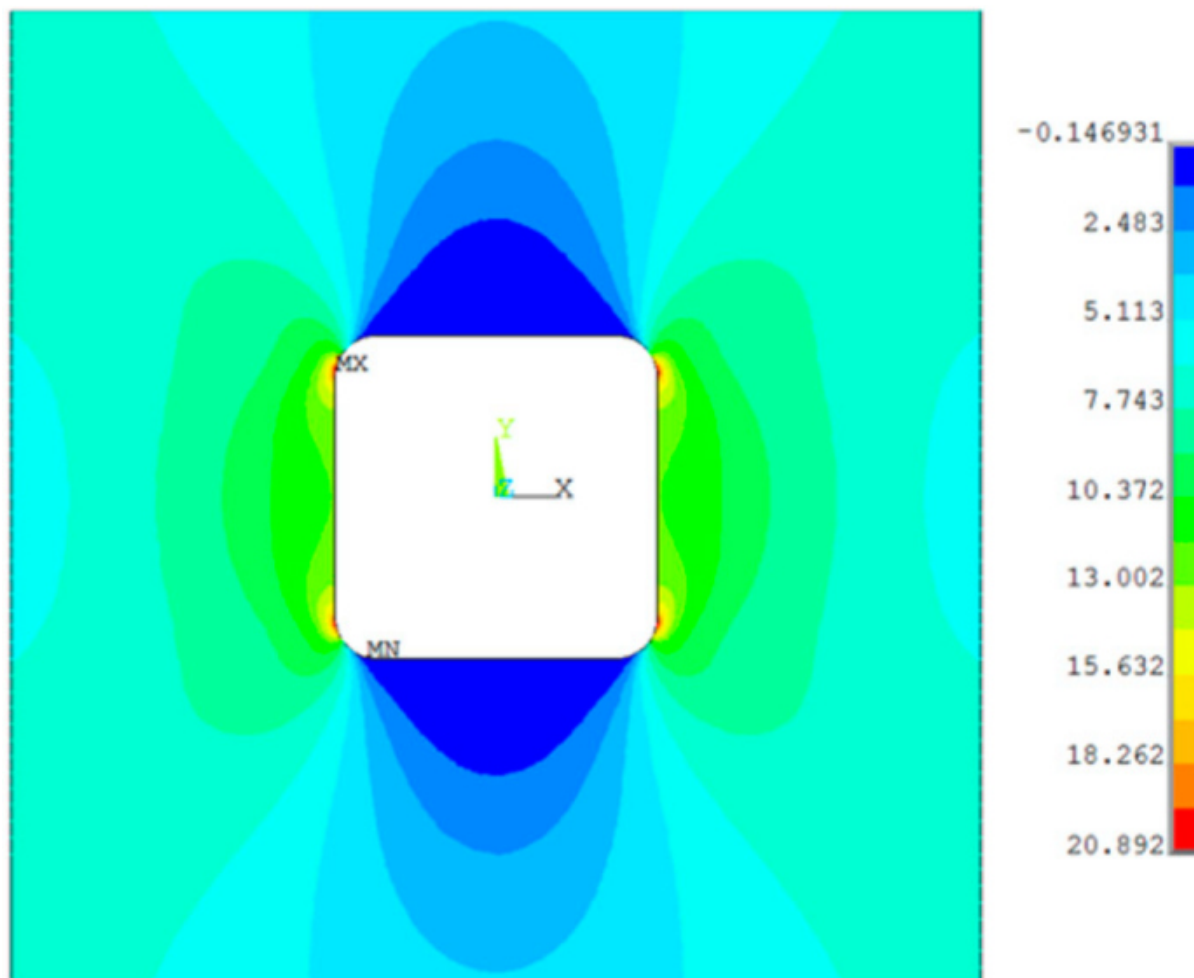
Zgodnie z oczekiwaniem zaobserwowano spiętrzenia naprężeń w narożach otworu, a dokładnie na granicy pionowej, prostej części krawędzi wyciętego otworu oraz części zakrzywionej (zaokrąglenie). Na podstawie odczytanej wartości określono wartość współczynnika kształtu w badanym karbie: $K_t=2,508$. Przedstawiony wynik stanowi bazowe rozwiązanie przyjęte do porównania w dalszej ocenie skuteczności stosowanych wzmocnień w formie nakładek.



Rysunek 4.10. Wygenerowana siatka elementów skończonych: a) widok główny elementu; b) przybliżenie miejsca otworu z zagęszczeniem siatki w miejscach spiętrzenia naprężeń.

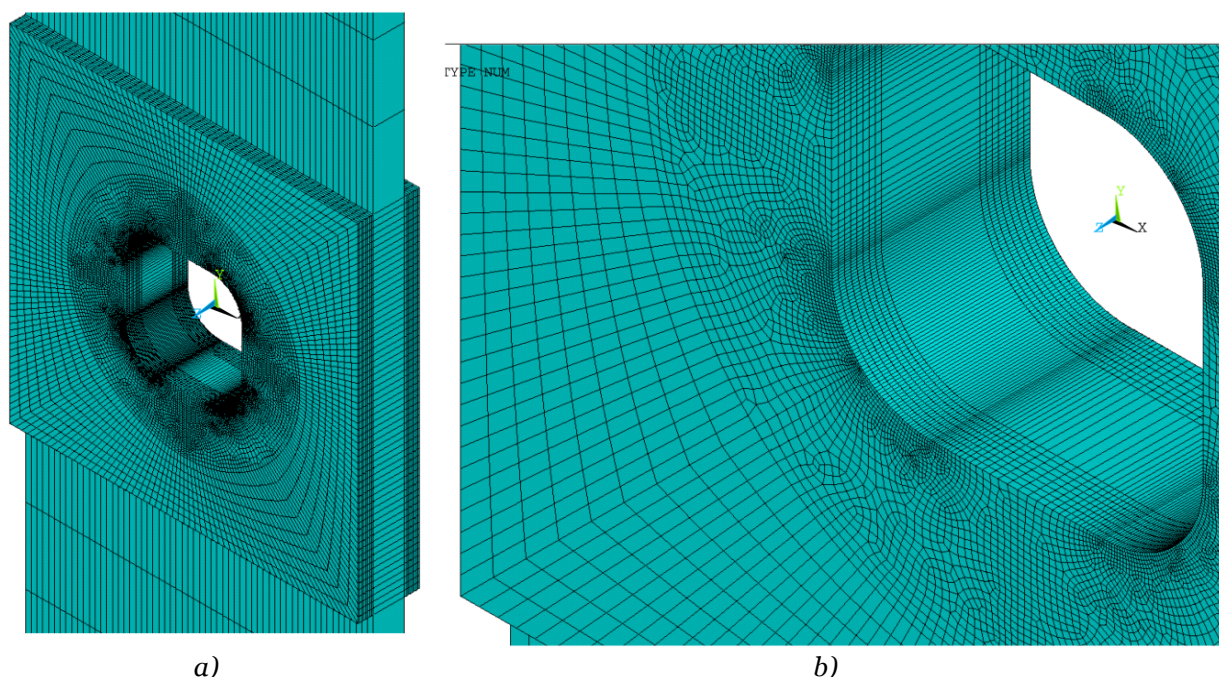


Rysunek 4.11. Przykładowe ułożenie kątów orientacji włókien θ wraz z numeracją warstw w modelu numerycznym.



Rysunek 4.12. Rozkład naprężeń σ_y dla elementu bez wzmocnienia dla zaokrąglenia naroży R_2 .

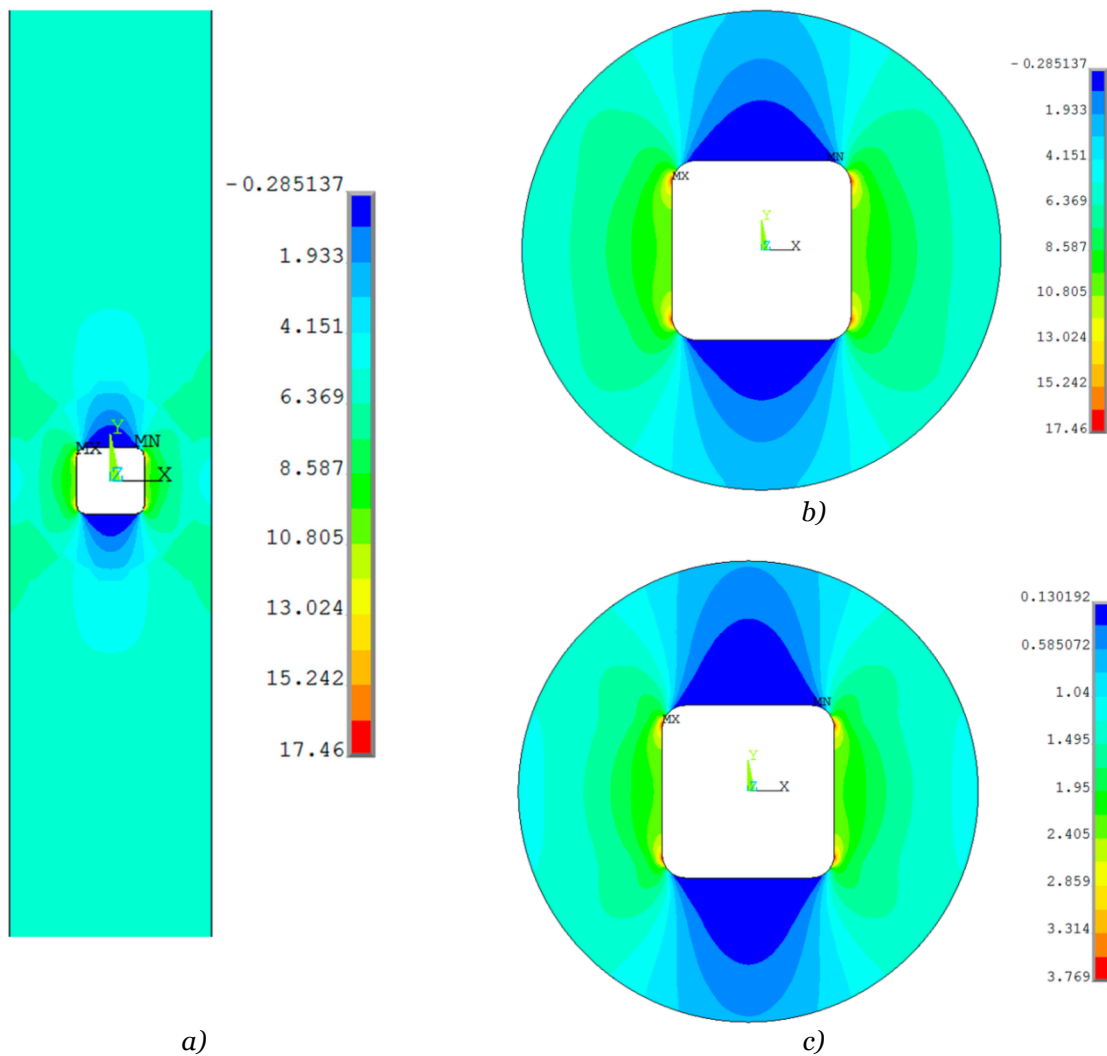
W analizie numerycznej dla elementów wzmocnionych nakładkami w strefie karbu istotną kwestią jest sposób zamodelowania i zagęszczenia siatki. Dlatego w trakcie generacji siatki łuk karbu został podzielony na kilkadziesiąt równych części, a prostoliniowy fragment krawędzi podzielono nierównomiernie z zagęszczeniem przy przejściu części prostoliniowej w zakrzywioną (**rys. 4.13b**). Dodatkowo w celu uzyskania identycznej siatki w otoczeniu najbardziej wyężonej strefy wykorzystano operację lustrzanego odbicia wygenerowanej siatki w powtarzalnej geometrycznie ćwiartce całego modelu. Przykładowy model dla nakładki kwadratowej (+A) $\square 45 \times 45$ został przedstawiony na **rys. 4.13**.



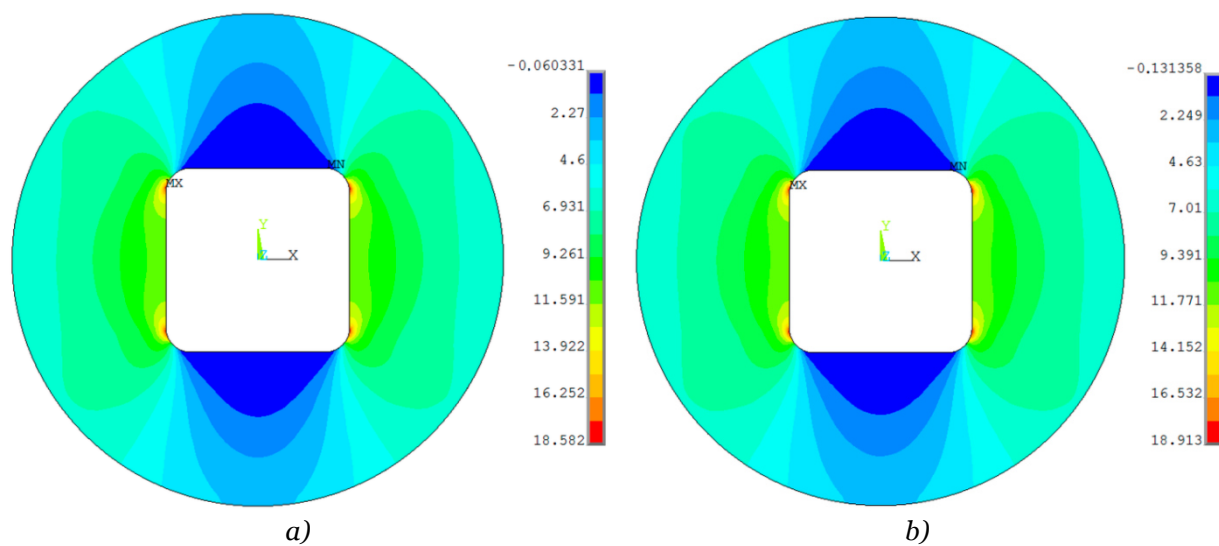
Rysunek 4.13. Siatka elementów skończonych dla przykładowej próbki z nakładką prostokątną o pełnej szerokości z rzeczywistą grubością poszczególnych warstw w powiększeniu:
 (a) widok perspektywiczny obszaru nakładki; b) szczegół obszaru narożnego nakładki.

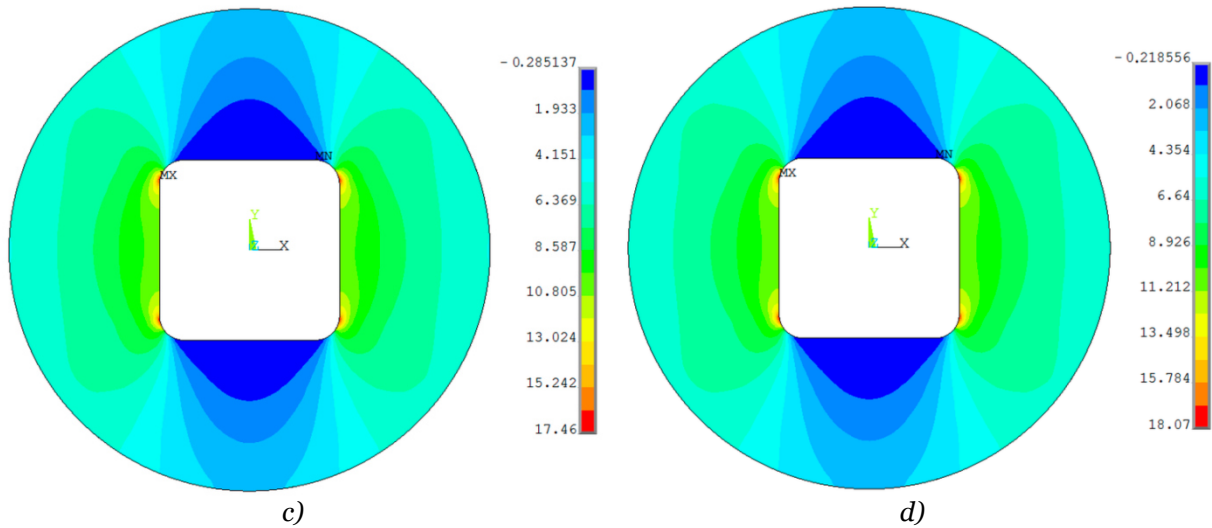
Na **rys. 4.14.–4.16.** przedstawiono rozkłady naprężeń w analizowanych próbkach z nakładkami kompozytowymi. Zestaw prezentowanych wyników dotyczy okrągłej nakładki umieszczonej wokół badanego karbu – kwadratowego otworu. Na **rys. 4.14.** przedstawiono rozkład naprężeń rozciągających dla promienia nakładki $R_{ov}=20\text{mm}$ oraz dla orientacji włókien $\theta=0^\circ$. Taki zestaw danych zapewnił minimalną koncentrację naprężeń dla rozpatrywanej próbki i konfiguracji warstw. Na **rys. 4.15.** pokazano porównanie naprężeń rozciągających σ_y dla różnych kątów orientacji włókien i dla $R_{ov}=20\text{mm}$. Naprężenia te są pokazane w obszarze pod kołową nakładką. Na **rys. 4.16.** zaprezentowano naprężenia rozciągające σ_y^{comp} w górnej warstwie nakładki.

Kolejne wyniki analiz dotyczą obliczonych numerycznie rozkładów naprężeń rozciągających wzdłuż odcinka CD (**rys. 4.17**), gdzie punkt C położony jest na krawędzi wyciętego w próbce otworu (karb, punkt z maksymalnym naprężeniem rozciągającym), a punkt D na zewnętrznej krawędzi próbki (odcinek CD jest usytuowany poziomo – końce mają tę samą wartość współrzędnej y). Na **rys. 4.18.a** pokazano i porównano rozkłady naprężeń rozciągających wzdłuż linii CD otrzymane dla różnych wartości promieni nakładek wzmacniających przy ustalonej orientacji włókien wzmacniających kompozyt (tutaj $\theta=0^\circ$). Taka orientacja włókien zapewnia maksymalną redukcję spiętrzenia naprężeń. Z kolei na **rys. 4.18.b** przedstawiono wyniki dla naprężeń rozciągających wzdłuż tej samej linii CD dla różnych orientacji włókien θ i dla ustalonej wartości promienia zewnętrznego nakładki kołowej ($R_{ov}=17,5\text{mm}$). Można zaobserwować, że orientacja włókien wzdłuż kierunku obciążenia elementu w nakładkach ($\theta=0^\circ$) zapewnia maksymalną redukcję naprężeń.

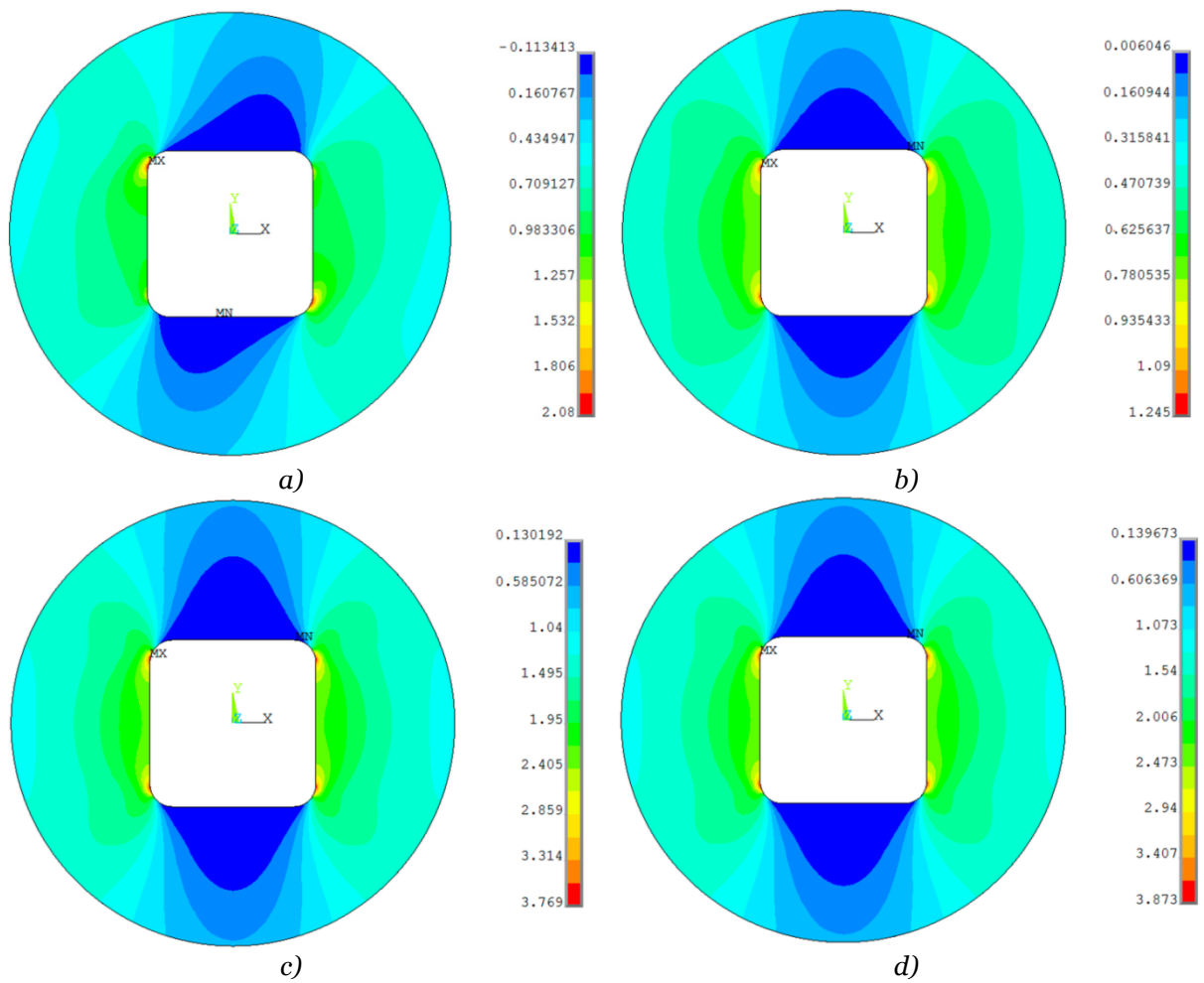


Rysunek 4.14. Rozkład naprężeń rozciągających σ_y w płycie stalowej dla nakładki kołowej $R_{ov}=20,0mm$ i $\theta=0^\circ$: a) w całej próbce (stalowy rdzeń); b) w obszarze części stalowej pod nakładką kołową; c) w warstwie kompozytowej nakładki.

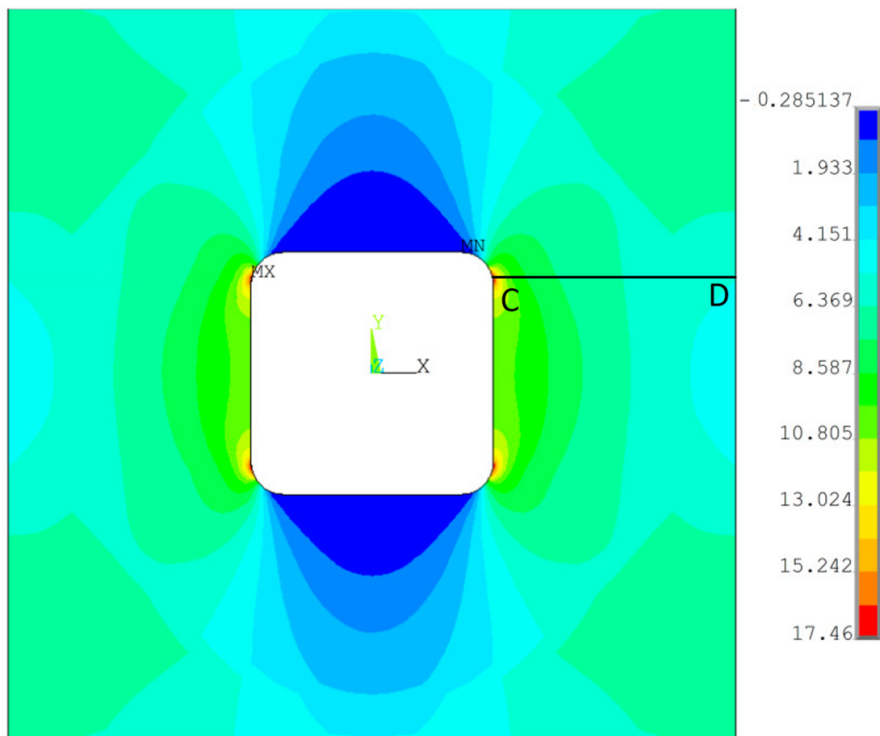




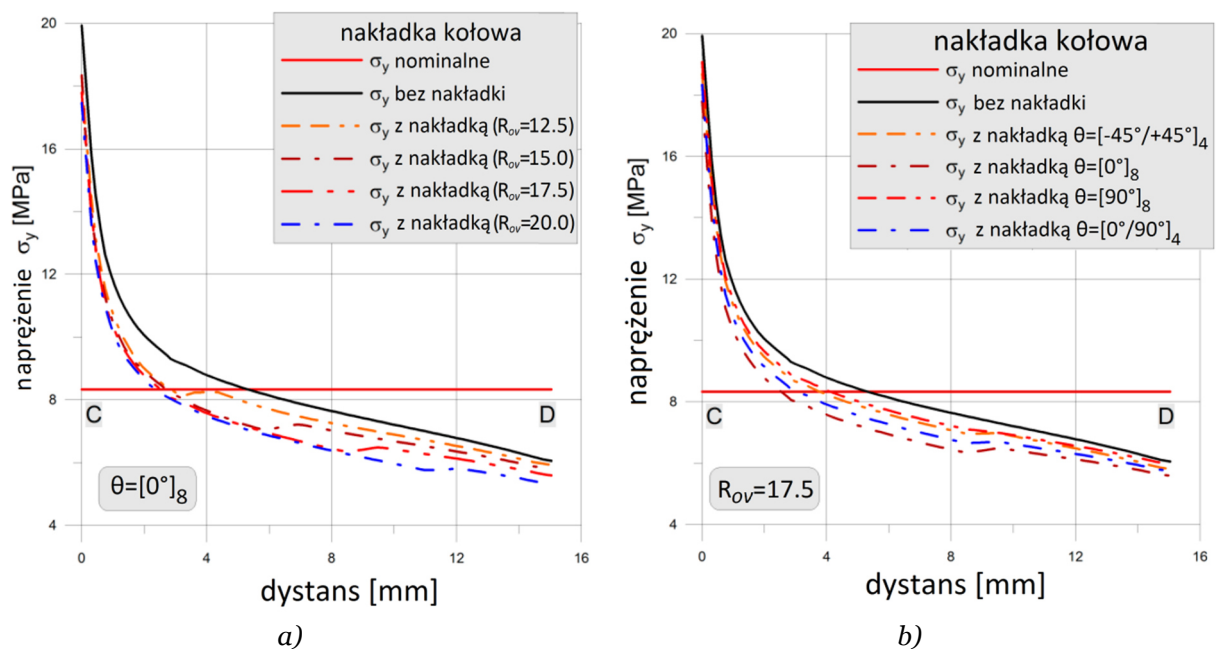
Rysunek 4.15. Rozkład naprężeń rozciągających σ_y w płycie stalowej dla nakładki kołowej $R_{ov}=20,0\text{mm}$ dla różnych kątów orientacji włókien: a) $\theta=[+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta=[90^\circ]_8$; c) $\theta=[0^\circ]_8$; d) $\theta=[0^\circ/90^\circ]_4$.



Rysunek 4.16. Rozkład naprężeń rozciągających σ_y^{comp} dla wierzchniej warstwy kompozytowej, rozmiar nakładki kołowej $R_{ov}=20\text{mm}$, dla różnych orientacji kątów włókien: a) $\theta=[+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta=[90^\circ]_8$; c) $\theta=[0^\circ]_8$; d) $\theta=[0^\circ/90^\circ]_4$.

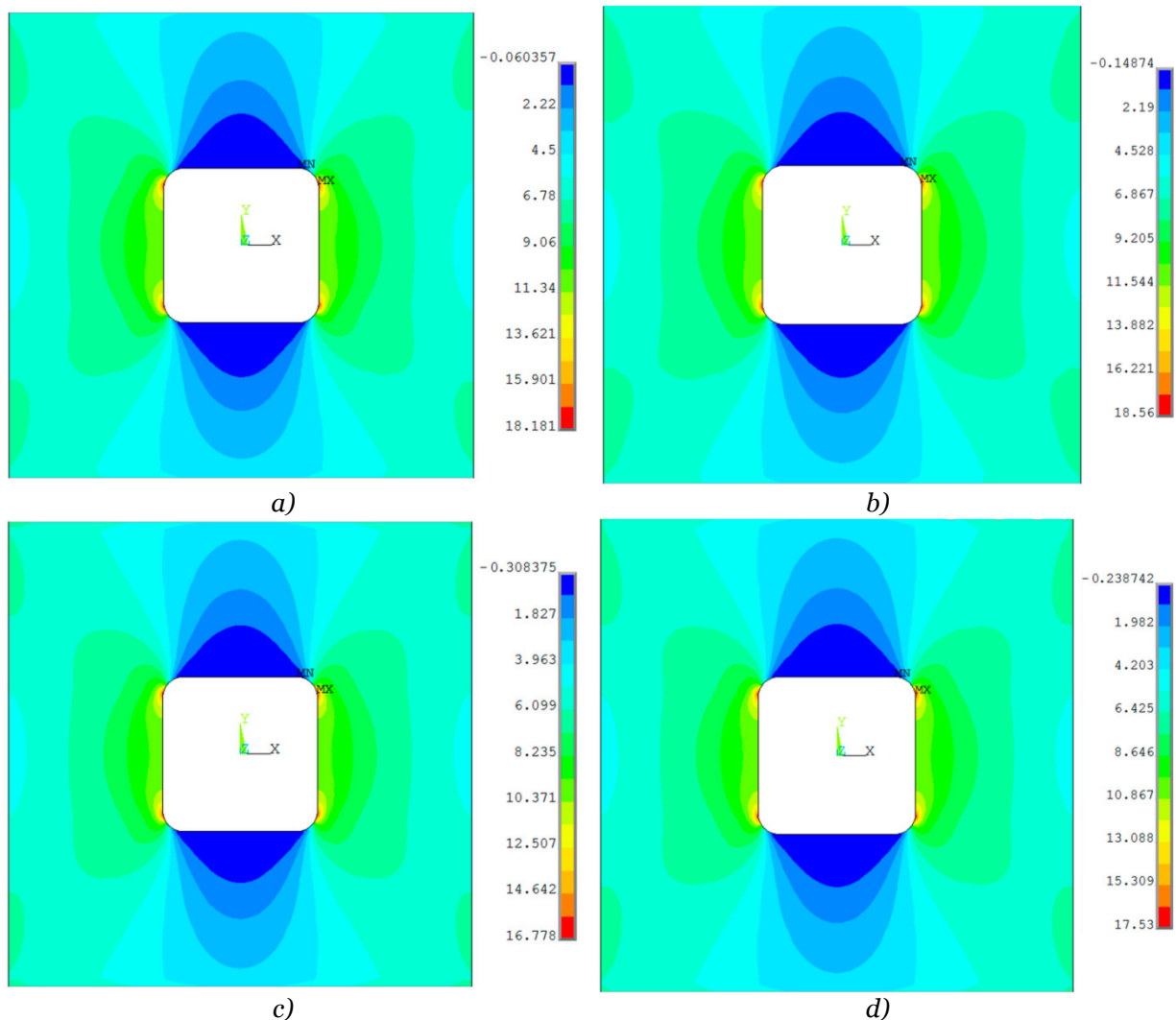


Rysunek 4.17. Ścieżka C-D użyta do wykreślenia rozkładu naprężeń rozciągających σ_y .

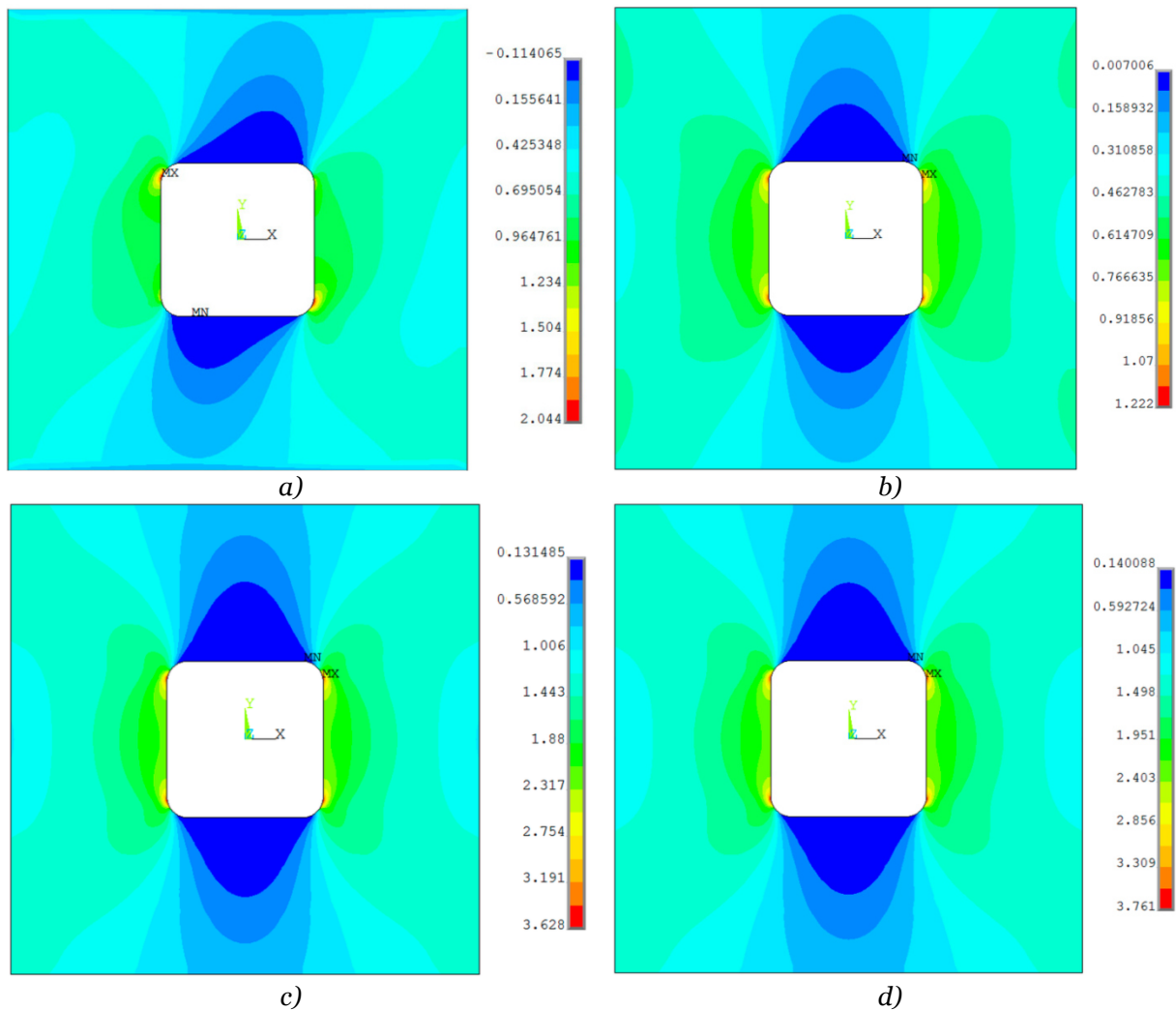


Rysunek 4.18. Rozkład naprężeń rozciągających σ_y dla stalowej płyty wzdłuż odcinka C-D przy wzmocnieniu w postaci kompozytowej nakładki o kształcie kołowym dla:
 a) różnych wartości promienia R_{ov} nakładki kołowej przy stałej orientacji włókien $\theta=0^\circ$;
 b) różnych kątów orientacji włókien θ przy stałym promieniu nakładki kołowej $R_{ov}=17.5$.

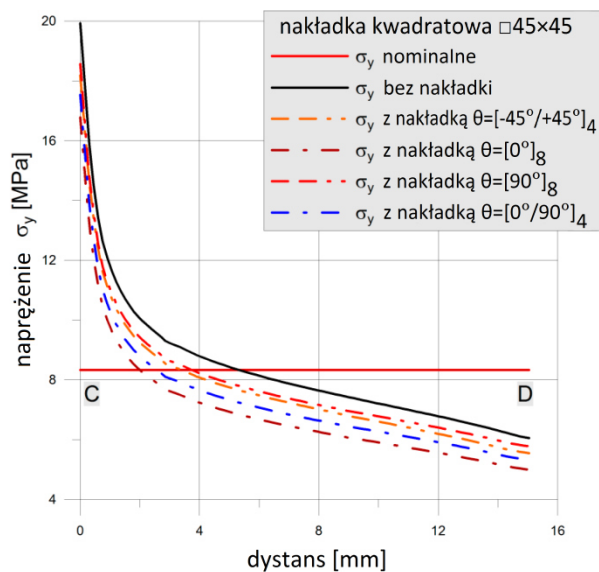
Kolejne analizy dotyczą zastosowania nakładek w postaci kwadratu ($\square 45 \times 45$). Zestaw uzyskanych wyników został zaprezentowany na **rys. 4.19.–4.21**. Odpowiednio, na **rys 4.19.** przedstawiono rozkład naprężeń rozciągających w części stalowej dla różnych orientacji włókien θ . Tak jak poprzednio orientacja włókien $\theta=0^\circ$ zapewnia największą redukcję naprężeń. Na **rys. 4.20.** przedstawiono rozkłady naprężeń pionowych σ_y^{comp} na zewnętrznej warstwie kompozytu. Analogicznie jak dla nakładki okrągłej przeprowadzono analizę rozkładu naprężeń pionowych w najbardziej osłabionym przekroju płyty stalowej (w rdzeniu stalowym). Jak poprzednio (**rys. 4.17**) wykorzystano linię CD , a rozkład naprężeń rozciągających został zaprezentowany na **rys. 4.21**. W tym wypadku badano jedynie wpływ kąta orientacji włókien wzmacniających kompozyt, gdyż nakładki miały ustalone wymiary geometryczne ($\square 45 \times 45$).



Rysunek 4.19. Rozkład naprężeń rozciągających σ_y w płycie stalowej dla nakładki kwadratowej $\square 45 \times 45$ dla kąta orientacji włókien: a) $\theta = [+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta = [90^\circ]_8$; c) $\theta = [0^\circ]_8$; d) $\theta = [0^\circ/90^\circ]_4$.



Rysunek 4.20. Rozkład naprężeń rozciągających σ_y^{comp} wierzchniej warstwy nakładki kompozytowej $\square 45 \times 45$ dla różnych orientacji kąta włókien w laminacie:
 a) $\theta = [+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta = [90^\circ]_8$; c) $\theta = [0^\circ]_8$; d) $\theta = [0^\circ/90^\circ]_4$.



Rysunek 4.21. Rozkład naprężeń rozciągających σ_y dla stalowej płyty wzdłuż odcinka C-D przy wzmocnieniu w postaci kompozytowej nakładki o kształcie kwadratowym $\square 45 \times 45$ dla różnych kątów orientacji włókien θ .

Zestawienie wyników przeprowadzonych badań numerycznych zaprezentowano w **tab. 4.3**. W tabeli zaprezentowano otrzymane wartości współczynnika kształtu K_t obliczone wg. wzoru (1.1) dla różnej konfiguracji włókien θ . Dodatkowo został zamieszczony udział naprężeń σ_{comp}^{ratio} przenoszonych przez nakładkę kompozytową σ_y^{comp} , w stosunku do obliczonego naprężenia nominalnego σ_{nom} dla poprzecznego przekroju uwzględniającego otwór. Wzór określający udział przenoszonych naprężeń został zaprezentowany poniżej:

$$\sigma_{comp}^{ratio} = \frac{\sigma_y^{comp}}{\sigma_{nom}} \quad (4.2)$$

Tabela 4.3. Wyniki numeryczne dla materiału HEXCEL TVR380, szerokość $W=45$ mm, grubość stalowej płyty (rdzenia) $t=4$ mm, $\sigma_{nom}=8,33$ MPa, ($F=1$ kN), otwór kwadratowy $\square 45 \times 45$ o promieniu zaokrąglenia naroży R_2 , dwie nakładki po 8 warstw każda – grubość jednej nakładki $t_{ov}=2$ mm, θ – orientacja kąta włókna w warstwach względem kierunku rozciągania.

Informacje / Opis	K_t [-]	σ_{comp}^{ratio} [-]	θ [°]
bez nakładki			
-	2.508	0.301	
nakładki kołowe (obustronne)			
$R_{ov}=12.5$	2.262	0.262	$[-45^\circ/+45^\circ]_{4N}$
$R_{ov}=15.0$	2.289	0.260	$[-45^\circ/+45^\circ]_{4N}$
$R_{ov}=17.5$	2.242	0.253	$[-45^\circ/+45^\circ]_{4N}$
$R_{ov}=20.0$	2.231	0.250	$[-45^\circ/+45^\circ]_{4N}$
$R_{ov}=12.5$	2.195	0.357	$[0^\circ]_8$
$R_{ov}=15.0$	2.201	0.359	$[0^\circ]_8$
$R_{ov}=17.5$	2.135	0.342	$[0^\circ]_8$
$R_{ov}=20.0$	2.096	0.452	$[0^\circ]_8$
$R_{ov}=12.5$	2.305	0.152	$[90^\circ]_8$
$R_{ov}=15.0$	2.334	0.154	$[90^\circ]_8$
$R_{ov}=17.5$	2.288	0.151	$[90^\circ]_8$
$R_{ov}=20.0$	2.270	0.149	$[90^\circ]_8$
$R_{ov}=12.5$	2.243	0.484	$[0^\circ/90^\circ]_{4N}$
$R_{ov}=15.0$	2.258	0.488	$[0^\circ/90^\circ]_{4N}$
$R_{ov}=17.5$	2.200	0.473	$[0^\circ/90^\circ]_{4N}$
$R_{ov}=20.0$	2.169	0.465	$[0^\circ/90^\circ]_{4N}$
nakładki kwadratowe (obustronne)			
$\square 45 \times 45$	2.183	0.245	$[-45^\circ/+45^\circ]_{4N}$
$\square 45 \times 45$	2.014	0.436	$[0^\circ]_8$
$\square 45 \times 45$	2.228	0.147	$[90^\circ]_8$
$\square 45 \times 45$	2.104	0.452	$[0^\circ/90^\circ]_{4N}$

Uzyskane wyniki spiętrzenia naprężeń K_t uzależnione są od kształtu i rozmiaru powierzchni nakładki wzmocniającej, a także od kierunku ułożenia włókien wzmocnienia. Najniższą wartość spiętrzenia naprężeń $K_t=2,014$ uzyskano dla nakładki o kształcie kwadratu z włóknami ułożonymi w kierunku obciążenia [$\theta=0^\circ$]. W wyniku symulacji numerycznych uzyskano 20% spadek współczynnika kształtu. Zaznaczyć należy, że pomiędzy rozważanymi nakładkami (kołowymi i kwadratowymi) przy ułożeniu włókien $[0^\circ]$ w kierunku obciążenia różnica spiętrzenia naprężeń wynosi jedynie $\Delta K_t=0,082$.

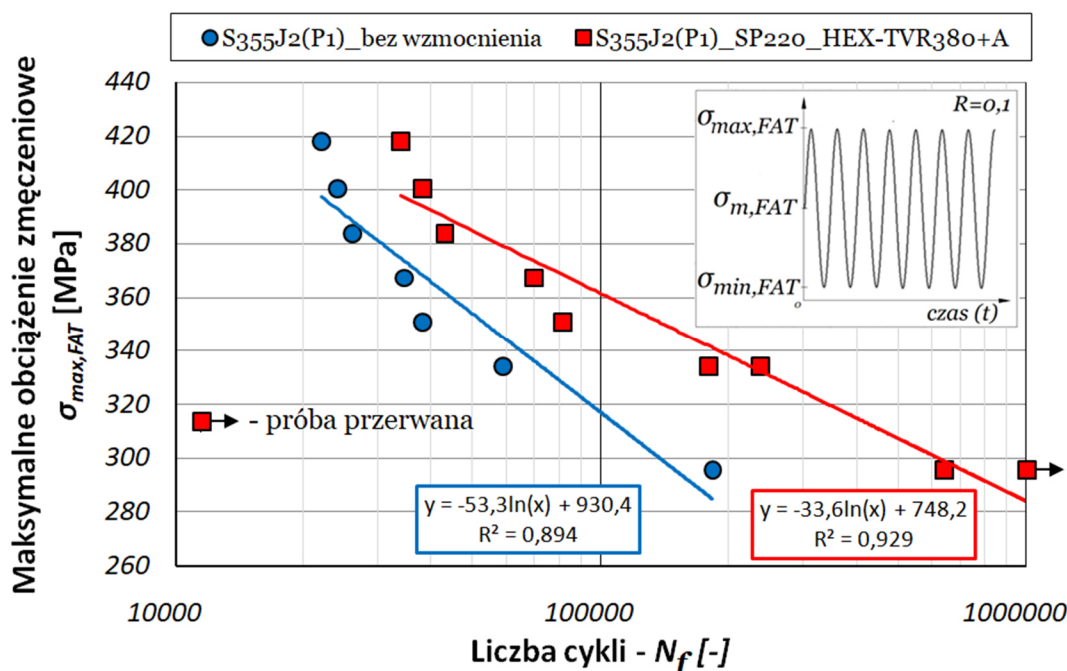
Kolejne analizy numeryczne przeprowadzono dla elementów które następnie zostały użyte do badań zmęczeniowych – wyniki znajdują się w **tab. 4.4**. W symulacji uwzględniono własności mechaniczne materiałów z **tab. 2.4**.

Tabela 4.4 Wyniki analizy numerycznej dla różnych form wzmocnienia, szerokość całego elementu $W=45$ mm, grubość stalowej płyty (rdzenia) $t=4$ mm, $\sigma_{nom}=8,33$ MPa, ($F=1$ kN), otwór kwadratowy z zaokrągleniem naroży o promieniu R_2 .

Materiał wzmocnienia	Rodzaj wzmocnienia	t_{ov}	K_t	θ	$A_{adhesive}$
		[mm]	[-]	[°]	[mm ²]
bez nakładki					
-	-	-	2.508	-	-
z nakładkami obustronnymi					
HEX-TVR380	+A	2.0	2.183	[+45°/-45°] _{4N}	3600
ROV-EP601	+A	2.0	2.036	[0/90°] ₈	3600
SP150/2000	+A	1.4	1.936	[0°]	3600
SP150/2000	+B	1.4	1.366	[0°]	10800

4.3. Skuteczność wzmocnienia nakładkami kompozytowymi przy wybranych poziomach obciążenia

Badania zmęczeniowe przeprowadzono dla wybranych poziomów obciążeń (szczegóły w **tab. 2.5**) w celu oceny skuteczności nakładek wzmacniających. Wszystkie testy wykonano przy stałym współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$, a próbki poddane były tylko działaniu cyklicznie zmiennych sił rozciągających. W pierwszej fazie badania zostały wykonane na elementach bez nakładek i określono ich trwałość zmęczeniową. We wzmocnionych próbkach (+A) zastosowano nakładki o grubości $t_{ov}=2$ mm w kształcie kwadratu. Wykonane zostały z kompozytu Hexcel TVR380 R-glass [+45°/-45°]_{4N}. Dla omawianej serii testów zastosowano spoiwo S&P Resin 220. Wyniki przeprowadzonych testów zostały zaprezentowane na **rys. 4.22** w formie krzywej Wöhlera.



Rysunek 4.22. Krzywa Wohlera dla przeprowadzonych testów zmęczeniowych dla próbek bez i z nakładkami wzmacniającymi (+A) z materiału Hexcel TVR 380 R-glass [+45°/-45°]_{4N} (spoiwo S&P Resin 220) dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

Na przedstawionym na **rys. 4.22.** wykresie można zauważyć przyrost trwałości zmęczeniowej elementów wzmocnionych względem elementów bez nakładek. Dokładne porównanie zostało zaprezentowane w **tab. 4.5.** Skuteczność nakładki obliczono w formie względnego przyrostu trwałości na podstawie wzoru (4.3):

$$\delta_{inc}^i = \left(\frac{N_f^i - N_f^{base}}{N_f^{base}} \right) \cdot 100\% \quad (4.3)$$

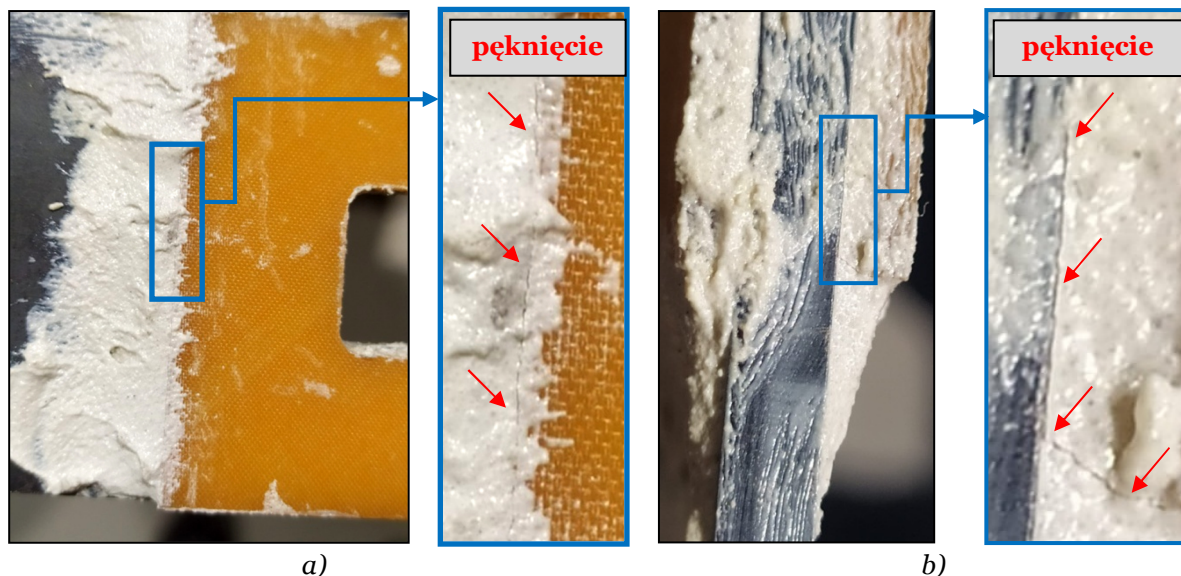
Tabela 4.5. Porównane trwałości zmęczeniowej elementów bez oraz z nakładkami (+A) o grubości $t_{ov}=2mm$, Hexcel TVR 380 R-glass [+45°/-45°]_{4N} o kształcie kwadratu □45×45 (spoiwo S&P Resin 220) dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

Maksymalne naprężenie rozciągające	Stopień obciążenia elementu	Trwałość elementu bez nakładki	Trwałość elementu z wzmocnieniem	Skuteczność / przyrost trwałości
$\sigma_{max,FAT}$ [MPa]	$\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}$	N_f^{base} [-]	N_f^i [-]	δ_{inc}^i [%]
296	0,81	182 678	642 713 / 1 000 000*	252 / 447
334	0,92	58 771	178 359 / 236 468	203 / 302
351	0,96	37 987	81 057	113
368	1,01	34 305	69 521	103
384	1,05	26 012	42 870	65
401	1,10	23 951	37 887	58
418	1,15	21 965	33 821	54

*próbka nie zniszczona, badanie przerwano.

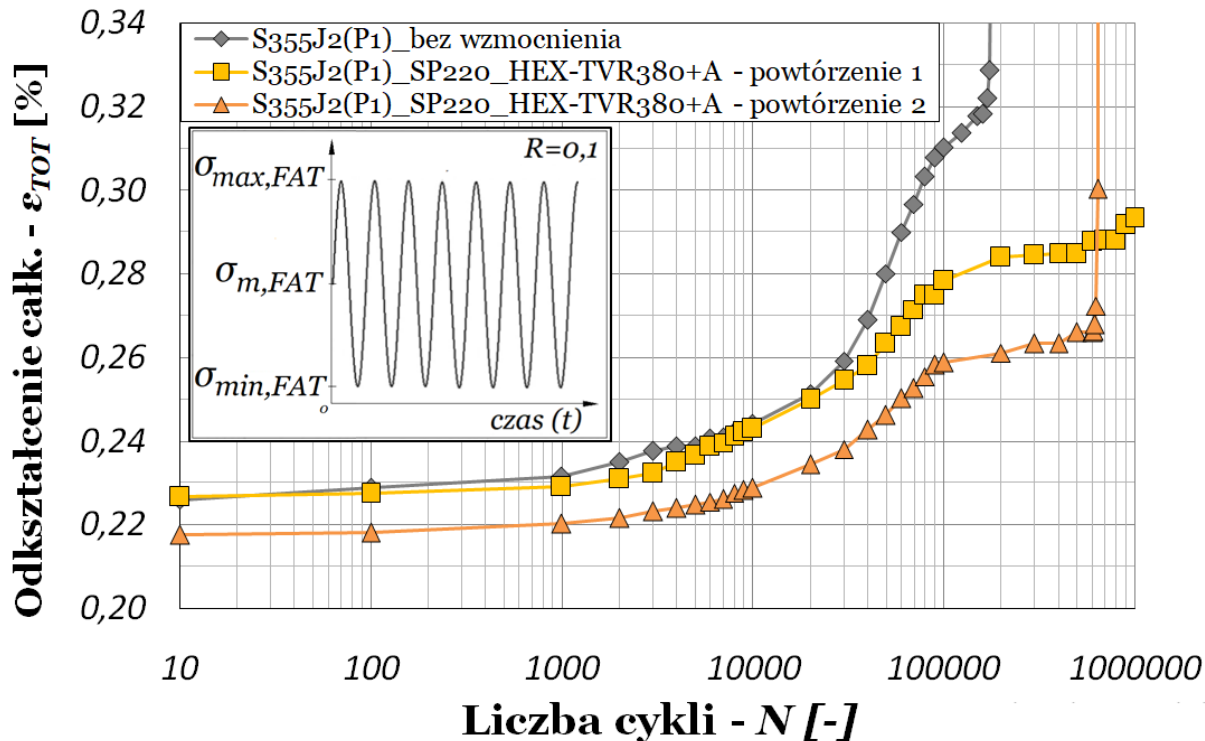
Przedstawione w **tab. 4.5.** porównanie parametru δ_{inc}^i umożliwia zaobserwowanie wyraźnego trendu związanego z uzyskaniem przyrostu trwałości zmęczeniowej elementów z nakładkami. Charakterystyczną cechą uzyskanych wyników badań jest wyraźny przyrost trwałości dla elementów badanych poniżej naprężenia wynoszącego $\sigma_{max,FAT} \leq 334$ MPa. Wskazane naprężenie znajduje się poniżej granicy plastyczności dla pierwszej partii materiału S355J2+N(P1) wynoszącej $Y_{eH} = 365$ MPa (**tab. 2.2.**).

Uzyskane wyniki przepracowanej liczby cykli dla naprężenia $\sigma_{max,FAT} = 296$ MPa świadczą o możliwości osiągnięcia znacznie lepszej trwałości zmęczeniowej w przypadku zastosowania próbek z nakładkami kompozytowymi. Krótszą trwałość jednego z badanych elementów można uzasadniać rozrzutem wyników, a także stopniem trudności przygotowania klejonych elementów co wpływa na późniejszą dokładność i powtarzalność wyników eksperymentu. Obserwacje makroskopowe przygotowanego elementu przed badaniem nie wykazały wyraźnych uchybień i nieprawidłowości. Jednakże zaznaczyć należy, że niezniszczony element z przepracowaną liczbą 1 miliona cykli (próba została przerwana) posiadał pęknięcia w strefie fazowania zakończenia spoiny klejowej. Pęknięcia zidentyfikowano przy około 300 tys. przepracowanych cykli. Zaobserwowane uszkodzenie zostało zaprezentowane na **rys. 4.23.** – w trakcie zadawanych kolejnych cykli obciążeń (czyli przez następne 700 tys. aż do zatrzymania testu) nie zaobserwowano dalszej propagacji uszkodzenia.



Rysunek 4.23. Próbkę z nakładkami (+A) Hexcel TVR 380 R-glass w formie $\square 45 \times 45$ (spoiwo S&P Resin 220) dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$; $N=1\ 000\ 000$ cykli: a) pęknięcie przy fazowaniu równoległe do obciążenia próbki; b) pęknięcie widoczne na grubości próbki w miejscu połączenia klejowego.

W celach porównawczych na **rys. 4.24.** zaprezentowano przebieg całkowitego odkształcenia mechanicznego elementu ϵ_{TOT} (mierzonego w osi rozciągania) w funkcji przepracowanej liczby cykli (N) przy $\sigma_{max,FAT}=296\text{MPa}$ dla próbki bez i ze wzmocnieniem.



Rysunek 4.24. Wykres całkowitego odkształcenia elementu ϵ_{TOT} w funkcji liczby cykli dla próbek bez i z nakładkami Hexcel TVR 380 R-glass w formie $\square 45 \times 45$ (spoiwo S&P Resin 220) dla $\sigma_{max,FAT}=296\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$, stopień obciążenia elementu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=0,81$.

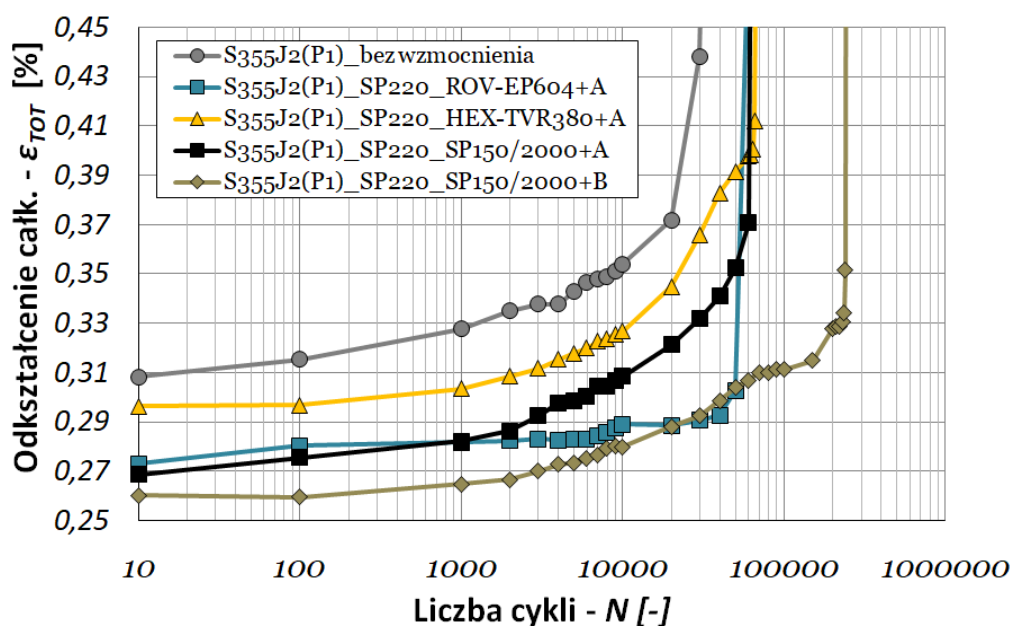
4.4. Wpływ rodzaju i kształtu wzmocnienia na trwałość zmęczeniową

W związku z uzyskanymi korzystnymi wynikami z poprzedniej serii testów zdecydowano się na jeszcze inną weryfikację wpływu rodzaju materiału i kształtu wzmocnienia na wytrzymałość zmęczeniową. Do badań przygotowano dodatkowe elementy wzmocnione nakładkami typu +A z tkaniny z włókna szklanego E-glass woven roving/epidian 601 o orientacji $[0^\circ/90^\circ]$ (ROV-EP601), a także z jednokierunkowego kompozytu węglowego S&P C-Laminate 150/2000 przy ułożeniu włókien $[0^\circ]$ w kierunku rozciągania. Inną formę wzmocnienia stanowiły dwustronnie pasy wzmacniające (+B) klejone na obrzeżach otworu w kierunku rozciągania po obu stronach – jak na **rys. 2.2.c**. Powodem wzmocnienia próbek pasami była konieczność zminimalizowania nierównomiernego obciążenia faz klejowych na końcach nakładek. W przypadku próbek z kwadratowymi nakładkami zaobserwowano silne koncentracje odkształceń w narożach fazy klejowej jak również nierównomierny rozkład odkształceń wzdłuż długości fazy klejowej (**rys. 4.4.d**) co negatywnie wpływało na trwałość połączenia. Zastosowanie nakładek w formie pasów znacząco zniwelowało problem nierównomiernego obciążenia fazy klejowej (**rys. 4.8**). Dla wszystkich wymienionych elementów zastosowano spoiwo klejowe S&P Resin 220. Testy wykonano dla obciążenia dla którego maksymalne obciążenie zmęczeniowe wynosiło $\sigma_{max,FAT}=368\text{MPa}$ ($R=0,1$). Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w **tab. 4.6**.

Tabela 4.6 Porównane trwałości zmęczeniowej elementów bez i z nakładkami w różnej konfiguracji materiału i kształtu przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=368\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$, poziom obciążenia elementu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=1,01$.

Kształt wzmocnienia	Opis materiału	Współczynnik spiętrzenia naprężeń	Liczba cykli	Przyrost trwałości
[-]	[-]	K_t [-]	N_f [-]	δ_{inc}^i [%]
-	-	2.508	$N_f^{base}=34\ 305$	-
(+A)	HEX-TV380 $[+45^\circ/-45^\circ]_{4N}$	2.183	$N_f^1=69\ 521$	103
	ROV-EP601 $[0^\circ/90^\circ]$	2.036	$N_f^2=61\ 916$	80
	SP150/2000 $[0^\circ]$	1.936	$N_f^3=66\ 337$	93
(+B)	SP150/2000 $[0^\circ]$	1.366	$N_f^4=243\ 659$	610

Zaprezentowane w **tab. 4.6** wyniki dla nakładek w formie kwadratu 45×45 nie wykazują znaczących różnic w trwałości pod względem zastosowanych trzech różnych materiałów kompozytowych. Jednakże zaznaczyć należy, że zastosowane dwustronne wzmocnienie w formie czterech pasów potwierdza swoją zasadność zastosowania. Wzmocnienie bocznych obszarów otworu w próbce podniosło trwałość zmęczeniową z poziomu $N_f=34\ 305$ na $N_f=243\ 659$ cykli – co stanowi wzrost trwałości o 610%. W celu porównania degradacji elementów na **rys. 4.25** zaprezentowano przyrost odkształcenia całkowitego ϵ_{TOT} względem liczby cykli dla wszystkich przebadanych próbek przy $\sigma_{max,FAT}=368\text{MPa}$.



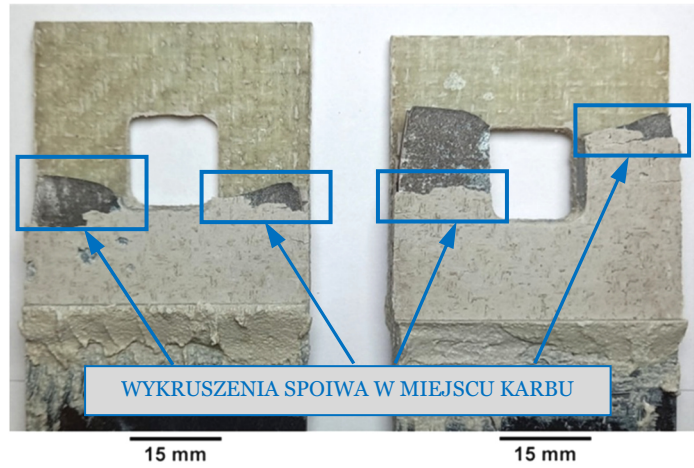
Rysunek 4.25. Wykres zmian odkształcenia ϵ_{TOT} w funkcji liczby cykli N dla wybranych próbek (spoiwo S&P Resin 220) z różnym kształtem i materiałem wzmocnienia badanych elementów dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$ przy obciążeniu $\sigma_{max,FAT}=368$ MPa, poziom obciążenia elementu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=1,01$.

Przedstawiony wykres dla badanych elementów wskazuje, że element bez wzmocnienia w trakcie badań wykazał się najwyższymi wartościami odkształcenia ϵ_{TOT} i jednocześnie najkrótszą trwałością wśród wszystkich badanych próbek. Najwyższą trwałość uzyskał element wzmocniony czterema prostokątnymi pasami (+B). Wykazuje on najmniejsze odkształcenie całkowite ϵ_{TOT} w trakcie badania do momentu zniszczenia w porównaniu z pozostałymi próbkami. Wzrost trwałości został określony $\delta_{inc}^i=610\%$ względem elementu bez wzmocnienia.

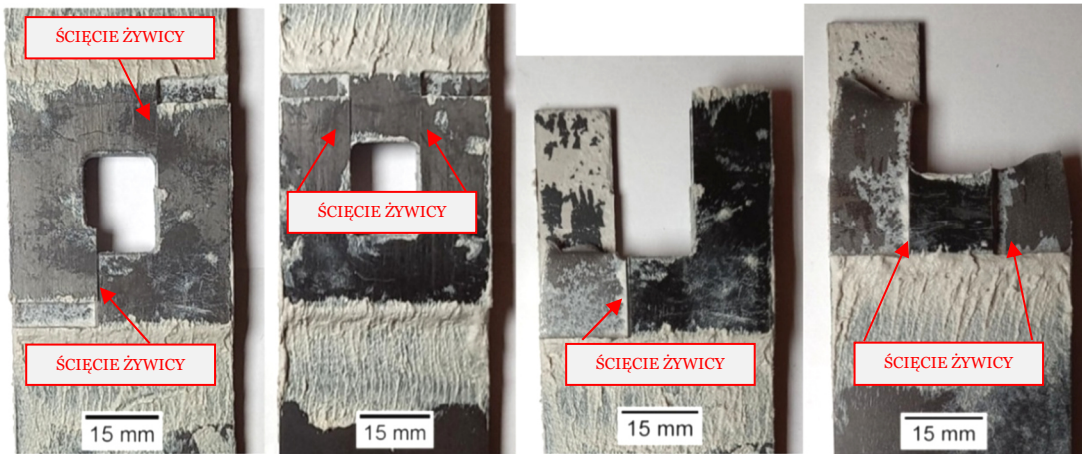
Zmiana materiału wzmocnienia nie przyczynia się do znaczącej poprawy trwałości, jednakże powoduje zmianę formy zniszczenia nakładek. Formy zniszczenia elementów z nakładkami zostały zaprezentowane na **rys 4.26**. Na podstawie zaprezentowanych form zniszczenia można zauważyć, że zarówno nakładki (+A) wykonane z materiału HEXCEL TVR380 R-glass jak również E-glass woven-roving/epidian 601 nie wykazują odrębnych cech uszkodzenia. W obu przypadkach decydującym czynnikiem jest degradacja połączenia klejowego poprzez pęknięcie inicjowane w miejscach zakończenia spoiwy klejowej na uformowanym fazowaniu – wynika to z faktu spiętrzenia naprężeń w fazowaniu kleju. Następnie zachodzi szybka propagacja wzdłuż nakładki co doprowadza do całkowitego zerwania połączenia. Podobny mechanizm obserwowany jest dla elementu wzmocnionego czterema pasami (+B) materiałem S&P C-Laminate 150/2000 na powierzchniach bocznych otworu (**rys. 4.26.**), jednakże w tym przypadku nie następuje natychmiastowe zerwanie całej nakładki. Pierwsza forma zniszczenia w postaci utraty spójności na części powierzchni pojawia się na łączeniu fazowania spoiwa z kompozytem. Bezpośrednią przyczyną tego stanu rzeczy mogą być naprężenia odrywające (σ_{peel}) lub naprężenia ścinające w warstwie kleju. Następnie wraz z kolejnymi cyklami następuje powolny rozwój pęknięcia wzdłuż pasów wzmacniających aż do miejsca karbu i całkowitego oderwania.



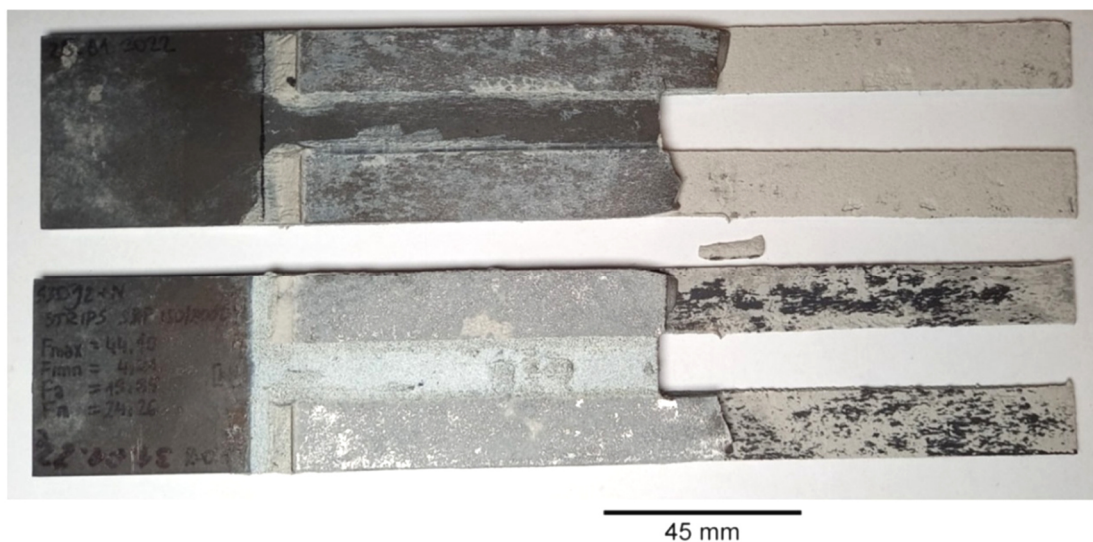
a) S355J2(P1)_SP220_HEX-TVR380+A



b) S355J2(P1)_SP220_ROV-EP601+A



c) S355J2(P1)_SP220_SP150/2000+A



d) S355J2(P1)_SP220_SP150/2000+B

Rysunek 4.26. Formy niszczenia elementów S355J2+N(P1) wzmocnionych różnymi nakładkami obciążonych $\sigma_{max, FAT} = 368$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R = 0,1$: a) HEXCEL TVR380 R-glass [+45°/-45°], +A; b) E-glass woven roving/epidian 601 [0°/90°], +A; c) S&P C-Laminate 150/2000 [0°], +A; d) S&P C-Laminate 150/2000 [0°], +B.

Odrębnym przypadkiem jest wzmocnienie typu +A wykonane z jednokierunkowego kompozytu S&P C-Laminate 150/2000. Jak można zauważyć na **rys. 4.26.c** oprócz zniszczenia w miejscu połączenia klejowego widoczne jest pęknięcie nakładki kompozytowej wzdłuż włókien w miejscu karbu. Jest to charakterystyczna forma zniszczenia dla kompozytów jednokierunkowych obciążonych w kierunku ułożenia włókien spowodowana ścięciem osnowy wzdłuż włókien. W związku z niską sztywnością i wytrzymałością żywicy względem sztywności i wytrzymałości włókien, na skutek dużej różnicy odkształceń w poszczególnych częściach nakładki (spowodowanych obecnością otworu) dochodzi do ścięcia żywicy wzdłuż krawędzi otworu (lub jego bliskim sąsiedztwie) w kierunku działania obciążenia. Zjawisko zostało zaprezentowane czerwonymi strzałkami wskazującymi miejsce ścięcia na **rys. 4.26.c**. Jest to kolejny argument za stosowaniem wzmocnień (+B) w postaci prostokątnych pasów w przypadku użycia nakładek z kompozytu jednokierunkowego o orientacji włókien $\theta=0^\circ$. Zatem dla wybranego przypadku zasadnym jest stosowanie wzmocnień (+B) o orientacji włókien $\theta=0^\circ$ na powierzchniach elementu z otworem. Ponadto powierzchnia klejowa (A_{adh}) wzmocnienia typu +B jest trzykrotnie większa niż wzmocnienia typu +A. Teoretycznie zwiększenie powierzchni nakładki powinno skutkować mniejszym i bardziej równomiernym obciążeniem złącza, a doświadczalnie znacząco podniesiono trwałość zmęczeniową elementu ze wzmocnieniem typu +B.

5. Wpływ rodzaju spoiwa na trwałość zmęczeniową

W poniższym rozdziale badaniom zostały poddane stalowe elementy z otworem kwadratowym ze wzmocnieniem w postaci czterech długich pasów (+B) naklejonych po obu stronach próbek. Montaż wzmocnienia został przeprowadzony za pomocą trzech wybranych klejów strukturalnych. Kontynuacja badań nad wzmocnieniami tego typu związana jest z uzyskanymi korzystnymi wynikami badań z poprzedniego rozdziału. Poniżej przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych, analizę wpływu grubości warstw kleju, a także wyniki uzyskane za pośrednictwem cyfrowej korelacji obrazu (*DIC*) i metody elementów skończonych (*MES*).

5.1. Skuteczność wybranych typów klejów strukturalnych na trwałość zmęczeniową

W poprzednich rozdziałach zostały przedstawione wyniki badań trwałości zmęczeniowej dla elementów z różnymi konfiguracjami wzmocnienia. Badania przeprowadzone zostały dla próbek, w których zastosowano spoiwo S&P Epoxy Resin 220. W związku z tym w celach porównawczych przeprowadzono dalszą serię badań z użyciem innych, wybranych rodzajów klejów strukturalnych takich jak 3M Scotch-Weld DP6310NS oraz HENKEL Loctite HY4080GY – ich własności zostały przedstawione w **tab. 2.3**.

Do badań wykorzystano drugą partię materiału S355J2(P2), której własności mechaniczne zostały zamieszczone w **tab. 2.1**. Biorąc pod uwagę wyniki badań z poprzedniej serii testów, do dalszych badań przyjęto najkorzystniejszą formę wzmocnienia zrealizowaną za pomocą czterech prostokątnych pasów wzmacniających (+B) wykonanych z materiału S&P 150/2000 naklejanych po obu stronach próbki przy otworze – jak na **rys. 2.2.c**. Jako obciążenie zmęczeniowe przyjęto $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$, dla którego trwałość zmęczeniowa próbek bez wzmocnienia wynosiła około 38 000 cykli (**tab. 5.1**). Stopień obciążenia określony został na poziomie $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=0,93$. Maksymalna siła rozciągająca dla próbek wykonanych z drugiej partii materiału S355J2+N(P2) wyniosła $F_{max}=47,5\text{kN}$. Podana wartość maksymalnego obciążenia jest wyższa od obciążeń zastosowanych dla pierwszej serii próbek (S355J2+N(P1) – $F_{max}=44,1\text{kN}$, rozdział 4 – **tab.4.6**). Wynika to z nieco wyższej wartości granicy plastyczności określonej w czasie testu rozciągania. Tak więc różnica w obciążeniu elementu stanowi $\Delta F_{max}=3,4\text{kN}$. Przekłada się to bezpośrednio nie tylko na wyższe naprężenie rozciągające w rdzeniu (σ), wyższe wartości naprężeń w karbie (σ_{max}), ale również na wyższe wartości naprężenia ścinającego w warstwie kleju (τ) i potencjalne naprężenia odrywające (σ_{peel}).

Dla drugiej partii materiału badania zmęczeniowe wykonano dla 13 próbek. Pierwszą grupę stanowią elementy bez wzmocnienia, które są bezpośrednim odniesieniem do oceny skuteczności zastosowanych wzmocnień. W kolejnych próbkach zastosowano wzmocnienie połączone z rdzeniem za pomocą trzech różnych wybranych typów spoiwa. Można wyróżnić w tym miejscu odpowiednio spoiwo epoksydowe (S&P Epoxy Resin 220), spoiwo poliuretanowe HY4080GY).

Tabela 5.1. Porównane trwałości zmęczeniowej N_f elementów wykonanych z S355J2+N(P2) z otworem kwadratowym 15×15 R2 bez i z wzmocnieniem typu +B dla wybranych typów spoiwa przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{\max, \text{FAT}} = 396$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R = 0,1$, stopień obciążenia $\sigma_{\max, \text{FAT}}/Y_{eH} = 0,93$.

Opis próbki		Liczba cykli	Średnia trwałość	Odchylenie standardowe	Średni wzrost trwałości	Wzrost trwałości*
[-]	L.P	N_f [-]	\bar{N}_f [-]	S_{N_f} [-]	$\bar{\delta}_{inc}$ [%]	[%]
S355J2(P2)_bez wzmocnienia	(1)	38 012	37 926	605	-	-
	(2)	37 283				
	(3)	38 483				
S355J2(P2)_SP220 _SP150/2000+B	(1)	56 283	74 613	17 002	97	48
	(2)	94 423				149
	(3)	82 170				117
	(4)	65 577				73
S355J2(P2)_DP6310 _SP150/2000+B	(1)	172 184	154 472	15 519	307	354
	(2)	143 258				278
	(3)	147 973				290
S355J2(P2)_HY4080 _SP150/2000+B	(1)	421 741	375 508	49 829	890	1012
	(2)	382 054				907
	(3)	322 730				751

*Indywidualny wzrost trwałości liczony w stosunku do średniej trwałości elementu bez wzmocnienia $\bar{N}_f = 37 926$ cykli.

Podane wyżej, wybrane kleje są wytworzone na różnych bazach klejowych i zalecane do łączenia kompozytów ze stalą. Wyniki z przeprowadzonych badań wraz z porównaniem i oceną statystyczną przedstawiono w **tab. 5.1**.

W celu określenia rozwoju oraz poziomu degradacji badanych próbek w trakcie badań zmęczeniowych analizowana była zmiana sztywności próbek. Sztywność (κ_i) dla i -tego cyklu zmęczeniowego obliczano według wzoru (5.1) podanego poniżej [51]:

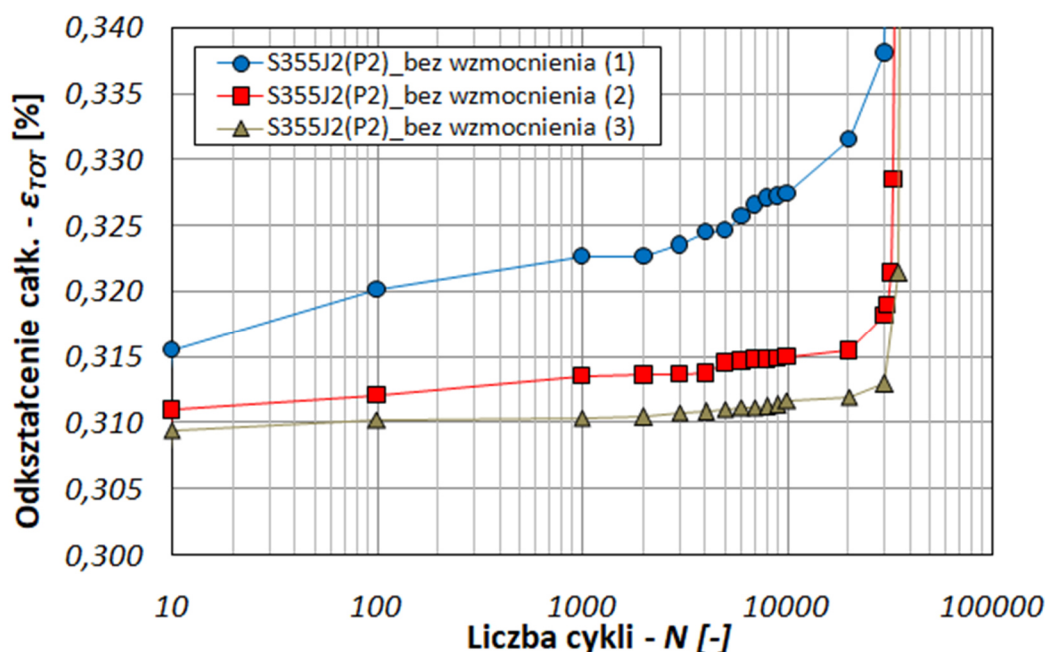
$$\kappa_i = \frac{F_{i, \max} - F_{i, \min}}{u_{i, \max} - u_{i, \min}} \quad (5.1)$$

gdzie: $F_{i, \max}$, $F_{i, \min}$ – oznaczają siłę maksymalną i siłę minimalną dla i -tego –cyklu zmęczeniowego; $u_{i, \max}$, $u_{i, \min}$ – oznaczają maksymalną i minimalną wartość deformacji (przemieszczenia) dla i -tego cyklu zmęczeniowego.

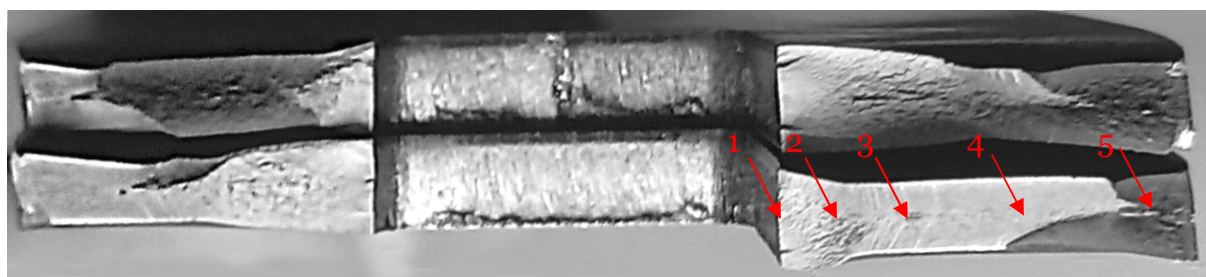
Odnosząc oszacowaną sztywność (κ_i) dla i -tego cyklu zmęczeniowego do sztywności nieuszkodzonej próbki (κ_0) możliwe jest określenie stopnia degradacji sztywności elementu w i -tym cyklu. Wartość początkowej sztywności (κ_0) wyznaczano dla cyklu $i_0 = 1 \cdot 10^3$ [51]. Wyniki z przeprowadzonych analiz zostały zaprezentowane w formie wykresów dla znormalizowanego współczynnika sztywności (κ_i/κ_0).

Uzyskane wyniki dla próbek bez wzmocnienia charakteryzują się wysoką powtarzalnością trwałości zmęczeniowej. Średnia trwałość z trzech testów została określona na $\bar{N}_f = 37 926$ cykli, a odchylenie standardowe wyniosło $S_{N_f} = 605$ cykli (**tab. 5.1**). Przebiegi odkształcenia całkowitego (ϵ_{TOT}) w funkcji liczby cykli zostały przedstawione na **rys. 5.1**.

Przykładowy przełom zmęczeniowy dla próbki bez wzmocnienia zaprezentowano na **rys 5.2**. Na zdjęciu przedstawiono przełom zmęczeniowy prezentujący pęknięcie i jego rozwój w kolejnych cyklach obciążenia. Inicjacja pęknięcia znajduje się w miejscu spiętrzenia naprężeń – tj. w karbie w miejscu gdzie promień zaokrąglenia przechodzi w pionową krawędź otworu.



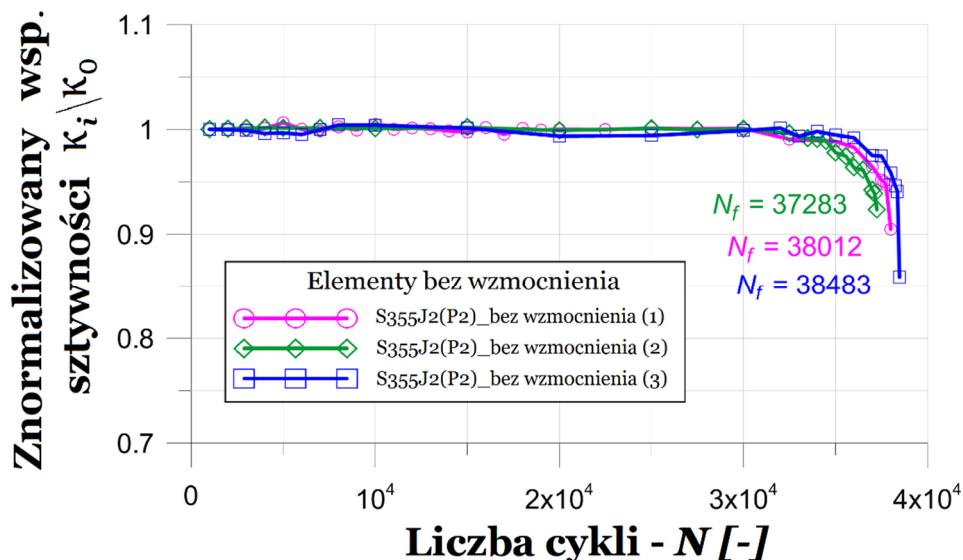
Rysunek 5.1. Wykres $\varepsilon_{TOT} - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – bez wzmocnienia – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.



Rysunek 5.2. Wybrany przełom zmęczeniowy dwóch części elementu bez wzmocnienia S355J2+N(P2)_bez wzmocnienia (1), $N_f=38\ 012$.

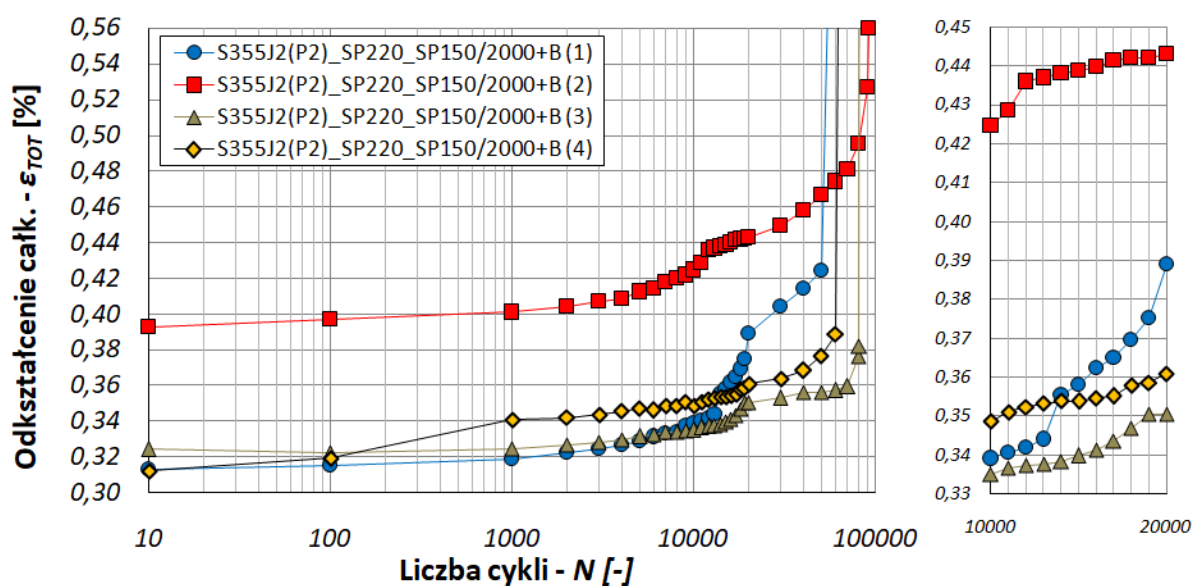
Na zdjęciu można zaobserwować charakterystyczną dla zmęczenia gładką i błyszczącą część przełomu w pobliżu karbu (ognisko i strefa przyogniskowa) – 1. W dalszej części przełomu widoczne są uskoki – 2 i linie zmęczeniowe – 3, świadczące o rozwoju strefy zmęczeniowej. W kolejnych cyklach rozwój pęknięcia zmęczeniowego prowadzi do pojawienia się strefy przejściowej – 4. Strefa przejściowa rozwija się aż do momentu, gdy zdegradowana część materiału jest na tyle duża, że przekrój nie jest w stanie przenosić obciążeń i następuje pęknięcie doraźne zwane również strefą resztkową lub złomem resztkowym – 5. Złom ten charakteryzuje się dużym rozwinięciem plastycznym, a także matową i nieregularną powierzchnią.

Na **rys 5.3.** został zaprezentowany przebieg zmian znormalizowanej sztywności (κ_i/κ_0) dla poszczególnych próbek bez nakładek. Dla większości zakresu nie zarejestrowano zmian w parametrze znormalizowanej sztywności. Spadek (κ_i/κ_0) powyżej 2% zaobserwowano dopiero po osiągnięciu co najmniej 94% zrealizowanych cykli do zniszczenia (N/N_f). Spadek ten związany jest z inicjacją pęknięć zmęczeniowych w korbach wokół otworu i ich propagacją. Należy tutaj podkreślić, że pojawienie się pierwszych uszkodzeń prowadzi do szybkiego zniszczenia próbek.

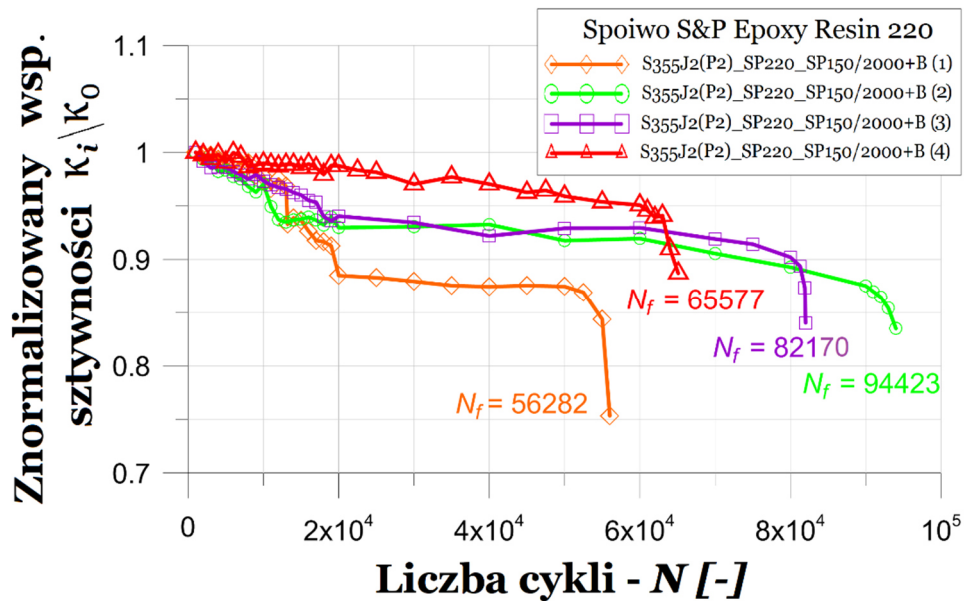


Rysunek 5.3. Wykres $\kappa_i/\kappa_0 - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – bez wzmocnienia – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

Próbki wykonane z użyciem epoksydowego spoiwa S&P Resin 220 uzyskały średnią trwałość $\bar{N}_f = 74\ 613$ cykli (**tab. 5.1.**). Odchylenie standardowe wyniosło $S_{N_f} = 17\ 002$ cykli. Średnia trwałość elementu z klejem S&P Resin 220 wzrosła o $\Delta\bar{N}_f = 36\ 687$ cykli względem niewzmocnionej próbki, co przekłada się na procentowy przyrost trwałości zmęczeniowej wynoszący $\bar{\delta}_{inc}^I = 97\%$. Przebiegi odkształcenia całkowitego (ϵ_{TOT}) w funkcji liczby cykli zostały przedstawione na **rys. 5.4.**, a zestawienie wykresów znormalizowanej sztywności (κ_i/κ_0) w funkcji liczby cykli (N) dla wszystkich próbek z klejem S&P Resin 220 zamieszczono na **rys. 5.5.**

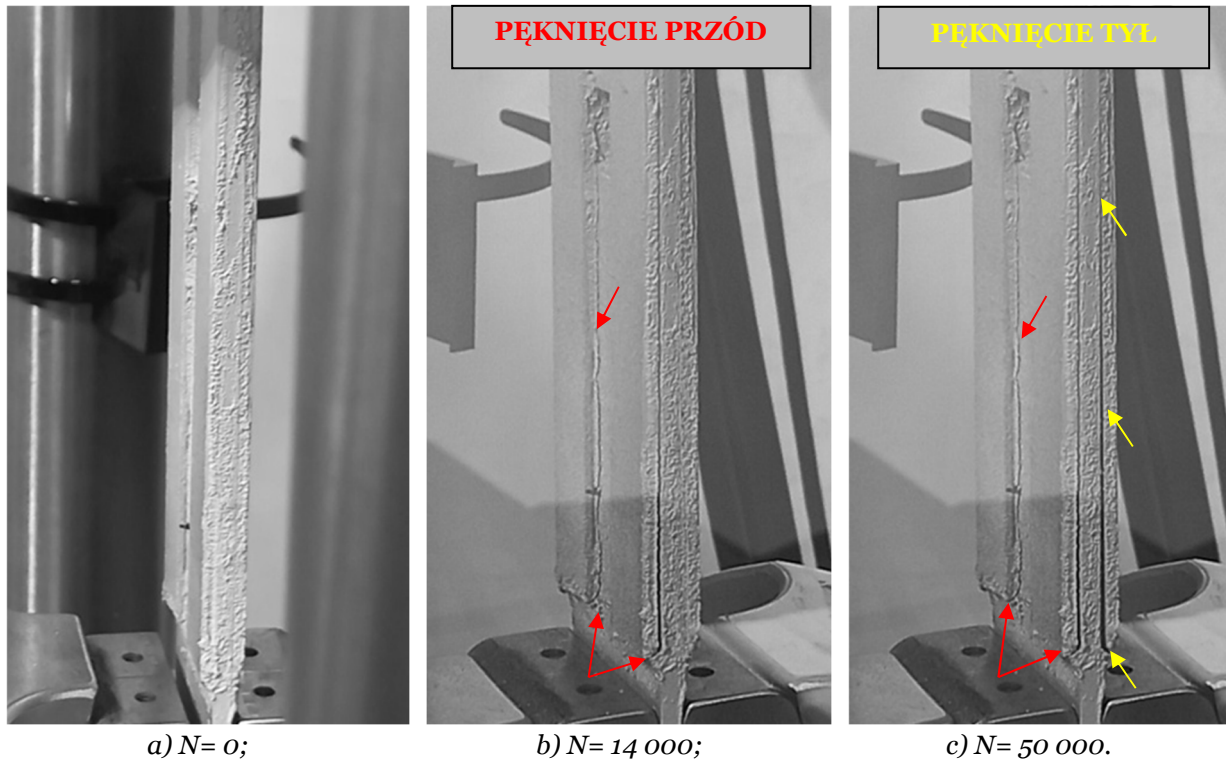


Rysunek 5.4. Wykres $\epsilon_{TOT} - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo S&P Resin 220 – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

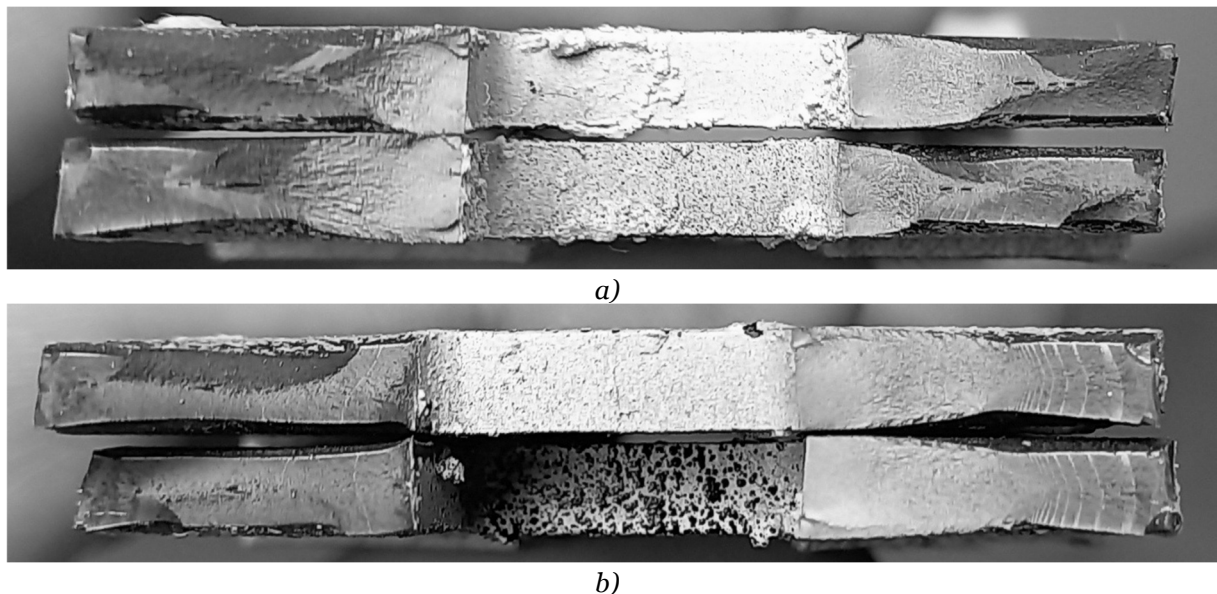


Rysunek 5.5. Wykres $\kappa_i/\kappa_0 - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo S&P Resin 220 – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

W przypadku zastosowania kleju S&P Resin 220 zaobserwowano płynną oraz skokową degradację połączenia klejowego w zasadzie od początku testu zmęczeniowego. Gwałtowne (skokowe) spadki sztywności związane były z odrywaniem się nakładek od rdzenia i zazwyczaj występowały pomiędzy 10 000 a 20 000 cykli. We wszystkich przypadkach zaobserwowano odrywanie się zakończeń obu pasów wzmacniających od rdzenia po jednej ze stron próbki. Należy zaznaczyć, że w momencie oderwania pozostałe dwa pasy po przeciwległej stronie próbki nie wykazywały widocznych wzrokowo uszkodzeń. Taki przebieg i charakter uszkodzenia powtarzał się w kolejnych próbach przeprowadzonych dla kleju S&P Resin 220 i został zaprezentowany na **rys. 5.6**. Przed całkowitym zniszczeniem elementu następuje oderwanie wzmocnienia po drugiej ze stron próbki. We wszystkich przypadkach odrywaniu nakładek towarzyszył głośny efekt akustyczny. Powyższy mechanizm degradacji połączenia można powiązać z kruchym pękaniem spoiwa S&P Resin 220. Utrata kohezji wzmocnienia z rdzeniem następuje w momencie osiągnięcia granicznej powierzchni przelomu zmęczeniowego w rdzeniu – co powoduje gwałtowne narastanie odkształceń i zniszczenie doraźne elementu. Zakres przyrostu trwałości elementu można określić w granicach $\delta_{inc}^i=48-149\%$ względem elementu bez wzmocnienia (**tab. 5.1**). Przykładowe przelomy wzmocnionych próbek w których spoiwem był klej S&P Resin 220 zostały zaprezentowane na **rys. 5.7**. Przełom próbki S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (1) zaprezentowany na **rys. 5.7.a** jest w dużej mierze jest zbliżony do przelomu próbek bez wzmocnienia. W przypadku tej próbki stosunkowo szybko doszło do obustronnego uszkodzenia połączeń klejowych, co w konsekwencji doprowadziło do najniższej trwałości zmęczeniowej próbki ($N_f=56\ 283$ cykli). Efekt ten jest również wyraźnie widoczny na wykresie znormalizowanej sztywności (**rys. 5.5.**) – znaczne spadki sztywności dla $N \approx 12\ 000$ i $N \approx 20\ 000$ cykli.



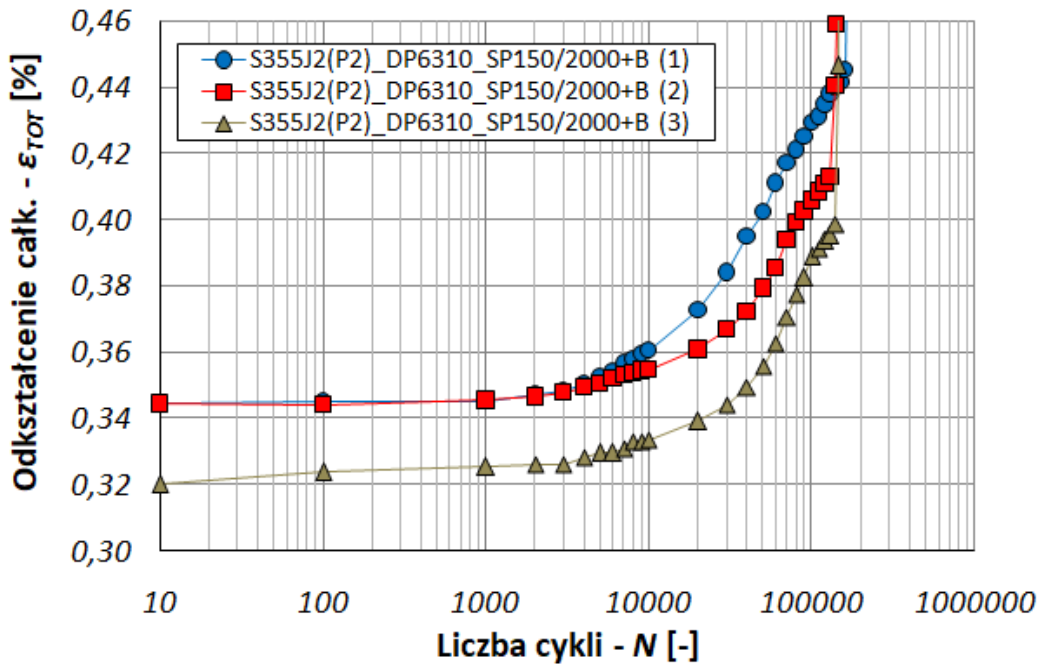
a) $N=0$; b) $N=14\ 000$; c) $N=50\ 000$.
Rysunek 5.6. Formy uszkodzenia zakończeń połączenia klejowego nakładki wzmacniającej (czerwone i żółte strzałki) dla wybranej liczby cykli - próbka $S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B(1)$, $N_f=56\ 283$.



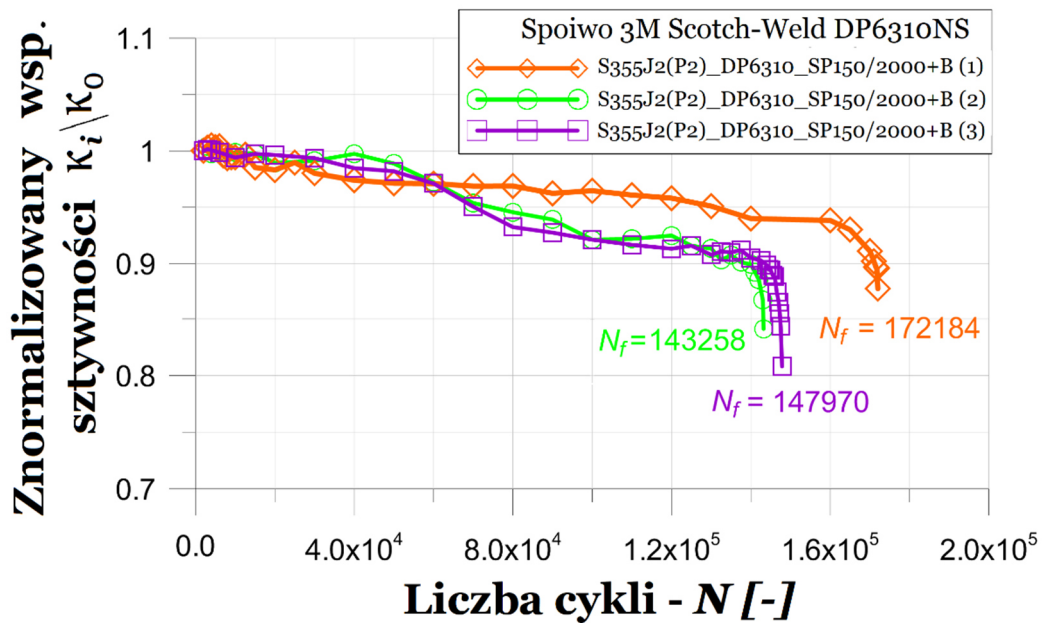
a) $S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B(1)$ - $N_f=56\ 283$;
 b) $S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B(2)$ - $N_f=94\ 423$.

W drugim przypadku (**rys. 5.7.b**), w którym próbka wytrzymała $N_f=94\ 423$ cykli, strefa zmęczeniowa posiada większy udział wraz z charakterystycznymi liniami zmęczenia (prawa strona zdjęcia), natomiast druga strona (lewa) posiada przełom doraźny i charakteryzuje się dużym plastycznym rozwinięciem powierzchni. W tym przypadku nakładki wzmacniające znacząco spowolniły proces degradacji rdzenia opóźniając tym samym procesy związane z inicjacją i rozwojem pęknięcia.

W przypadku zastosowania poliuretanowego kleju 3M Scotch-Weld DP6310NS średnia trwałość osiągnęła $\bar{N}_f = 154\,472$ cykli, a odchylenie standardowe wyniosło $S_{N_f} = 15\,519$ cykli. Przyrost trwałości zmęczeniowej wyniósł $\bar{\delta}_{inc}^i = 307\%$ względem próbek bez wzmocnienia oraz $\Delta\delta_{inc}^i = 210\%$ względem średniej trwałości spoiwa S&P Resin 220. Przebiegi całkowitego odkształcenia elementu (ϵ_{TOT}) w funkcji liczby cykli zostały przedstawione na **rys. 5.8**. Zmianę sztywności elementów ze spoiwem DP6310NS w trakcie badań zmęczeniowych zaprezentowano na **rys. 5.9**.

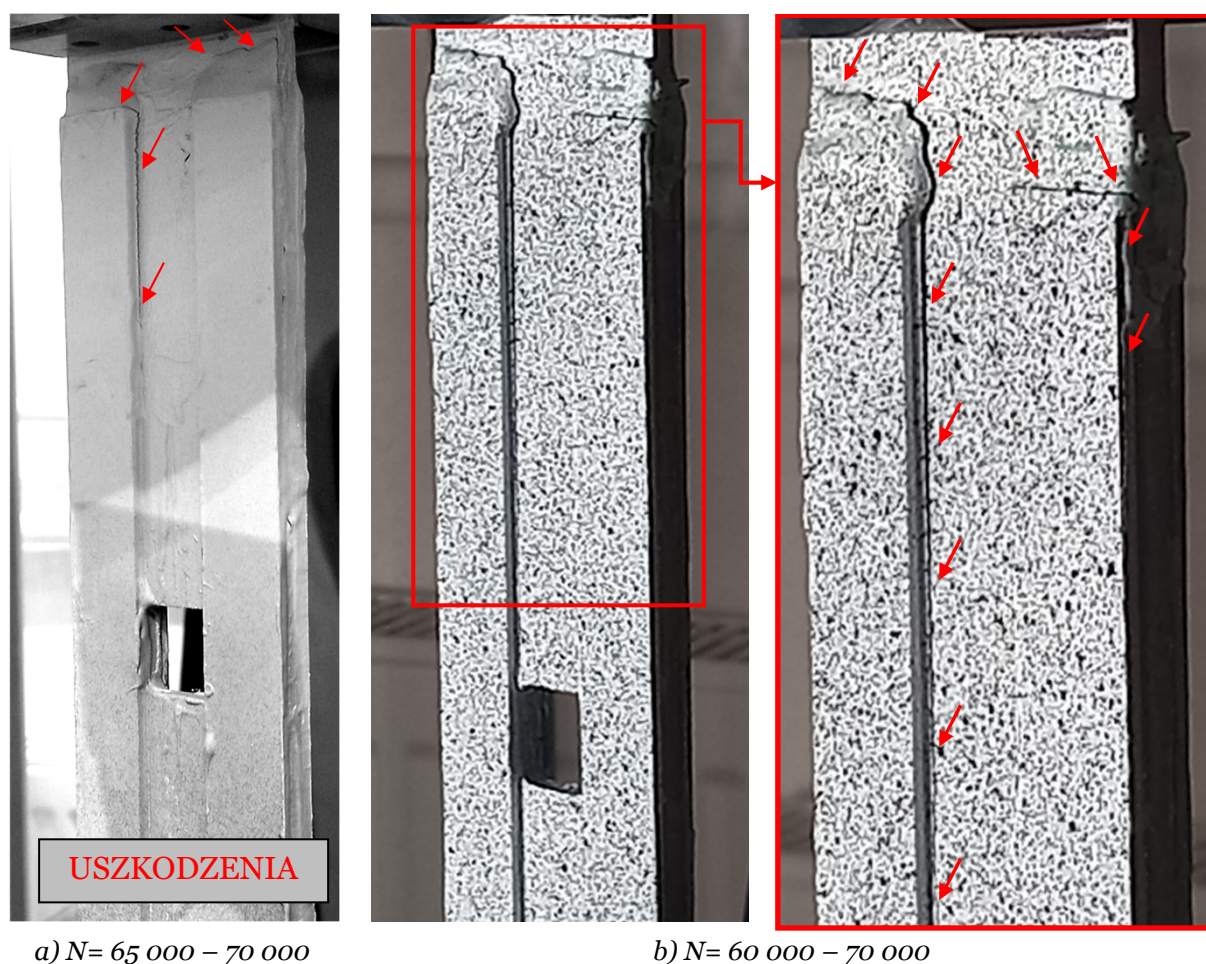


Rysunek 5.8. Wykres $\epsilon_{TOT} - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo 3M Scotch-Weld DP6310NS – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT} = 396 \text{ MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R = 0,1$.



Rysunek 5.9. Wykres $\kappa_i/\kappa_0 - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo 3M Scotch-Weld DP6310NS – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT} = 396 \text{ MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R = 0,1$.

Charakter degradacji badanych elementów objawia się cyklicznym i bardziej regularnym przyrostem uszkodzenia (**rys. 5.9**) niż w przypadku kleju S&P Resin 220. Wyraźne spadki sztywności widoczne są w zakresie $N=4 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^4$ cykli. W tym zakresie obserwowano również częściowe odrywanie się nakładek od rdzenia. Proces odrywania charakteryzował się powolną i płynną degradacją złącza klejowego. Inicjacja pęknięć miała miejsce na łączeniu fazowania spoiny klejowej z nakładką kompozytową. Następnie wraz z kolejnymi cyklami obciążenia, pęknięcia propagowały się wzdłuż połączenia klejowego w kierunku karbu. W odróżnieniu od kleju S&P Resin 220 odrywaniu nakładek nie towarzyszył żaden słyszalny dźwięk. Można zaobserwować, że próbka nr 1 w całym badaniu wykazywała się najbardziej stabilną degradacją sztywnością, co jednocześnie doprowadziło do uzyskania najwyższej trwałości zmęczeniowej $N_f=172\ 184$ cykli. Przykładowy proces degradacji złącza zamieszczono na rysunku **rys. 5.10**. Uszkodzenia miały charakter lokalny na jednym z pasów wzmacniających, a wraz z przyrastającą liczbą cykli pojawiały się na kolejnych zakończeniach wzmocnienia.

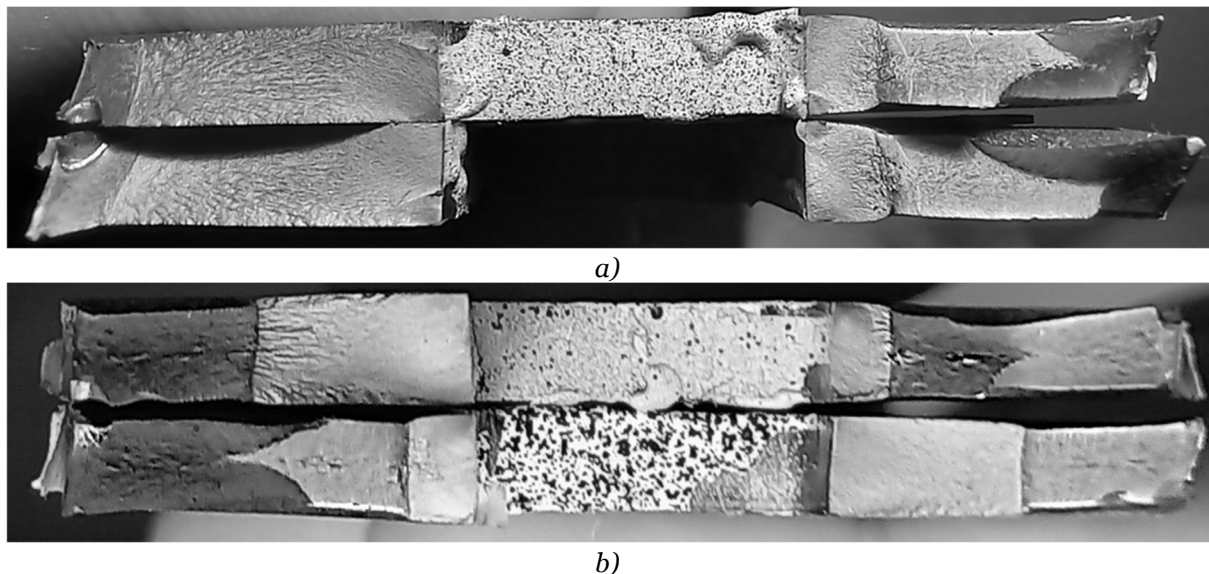


a) $N=65\ 000 - 70\ 000$

b) $N=60\ 000 - 70\ 000$

Rysunek 5.10. Formy uszkodzenia zakończeń połączenia klejowego nakładki wzmacniającej (czerwone strzałki) dla wybranej liczby cykli:

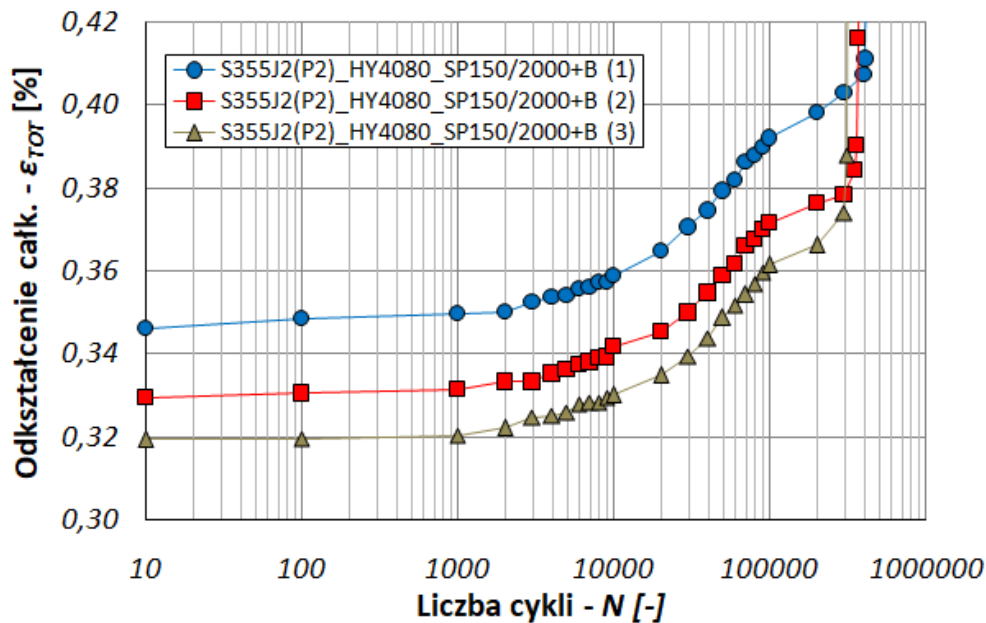
- a) próbka S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1) - $N_f=172\ 184$;
- b) próbka S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3) - $N_f=147\ 973$.



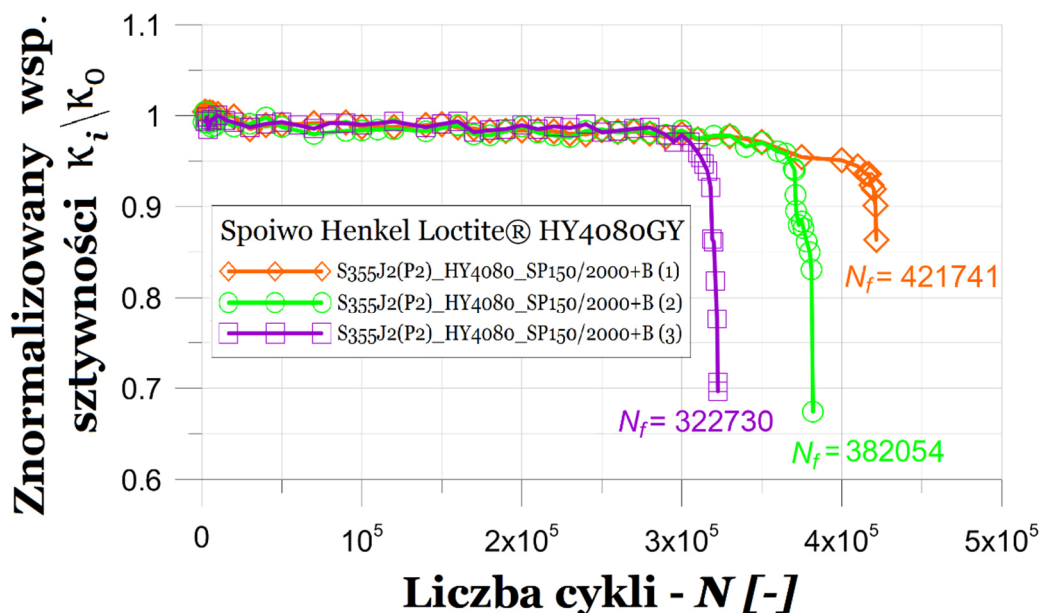
Rysunek 5.11. Przełomy zmęczeniowe elementów dla spoiwa 3M Scotch-Weld DP6310NS:
 a) S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1) – $N_f=172\ 184$;
 b) S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3) – $N_f=147\ 973$.

Na **rys. 5.11.** zostały zaprezentowane przykładowe dwa przełomy zmęczeniowe. W przypadku próbki nr 1 (**rys. 5.11.a**), można zaobserwować, że jedna ze stron została lepiej odciążona i bardziej wzmocniona przez nakładkę kompozytową – świadczy o tym większy udział gładkiej powierzchni stanowiącej przełom zmęczeniowy. Dla próbki nr 3 (**rys. 5.11.b**) można zaobserwować większy udział matowej i nieregularnej powierzchni przełomu świadczącej o strefie doraźnej – co wiąże się z mniejszą liczbą przebytych cykli (N_f). Dla obydwu zaprezentowanych przypadków można zauważyć, że powierzchnia strefy zmęczeniowej posiada większy udział niż ma to miejsce w przypadku dla spoiwa S&P Resin 220 (**rys. 5.7.a**) – gdzie uzyskano niższe wartości trwałości zmęczeniowej.

Próbki, w których wzmocnienie przyklejono przy użyciu kleju Loctite HY4080GY uzyskały średnią trwałość zmęczeniową wynoszącą $\bar{N}_f = 375\ 508$ cykli. Odchylenie standardowe wyniosło $S_{N_f} = 49\ 829$. Procentowy wzrost trwałości względem elementu bez wzmocnienia osiągnął wartość $\overline{\delta_{inc}^t} = 890\%$. Przebiegi odkształcenia całkowitego (ϵ_{TOT}) w funkcji liczby cykli zostały przedstawione na **rys. 5.12**, a wykresy znormalizowanego współczynnika sztywności (κ_i/κ_0) na **rys. 5.13**. Porównując wyniki uzyskane dla spoiwa HY4080GY (brak widocznych spadków sztywności aż do momentu zniszczenia elementu - **rys. 5.13**) z wynikami otrzymanymi dla pozostałych klejów zauważono największy wzrost trwałości zmęczeniowej jak również najbardziej stabilne zachowanie się spoiny klejowej. W trakcie badań wszystkich próbek ze spoiwem HY4080GY na żadnym z etapów nie pojawiły się oderwania, pęknięcia lub nieciągłości w spoinie klejowej. Zastosowanie tego kleju pozwala na zniwelowanie efektu odrywania zakończenia nakładek na końcach pasów wzmacniających – co było głównym powodem przedwczesnego zniszczenia elementów dla wcześniej badanych klejów (S&P Resin 220 i DP6310NS).

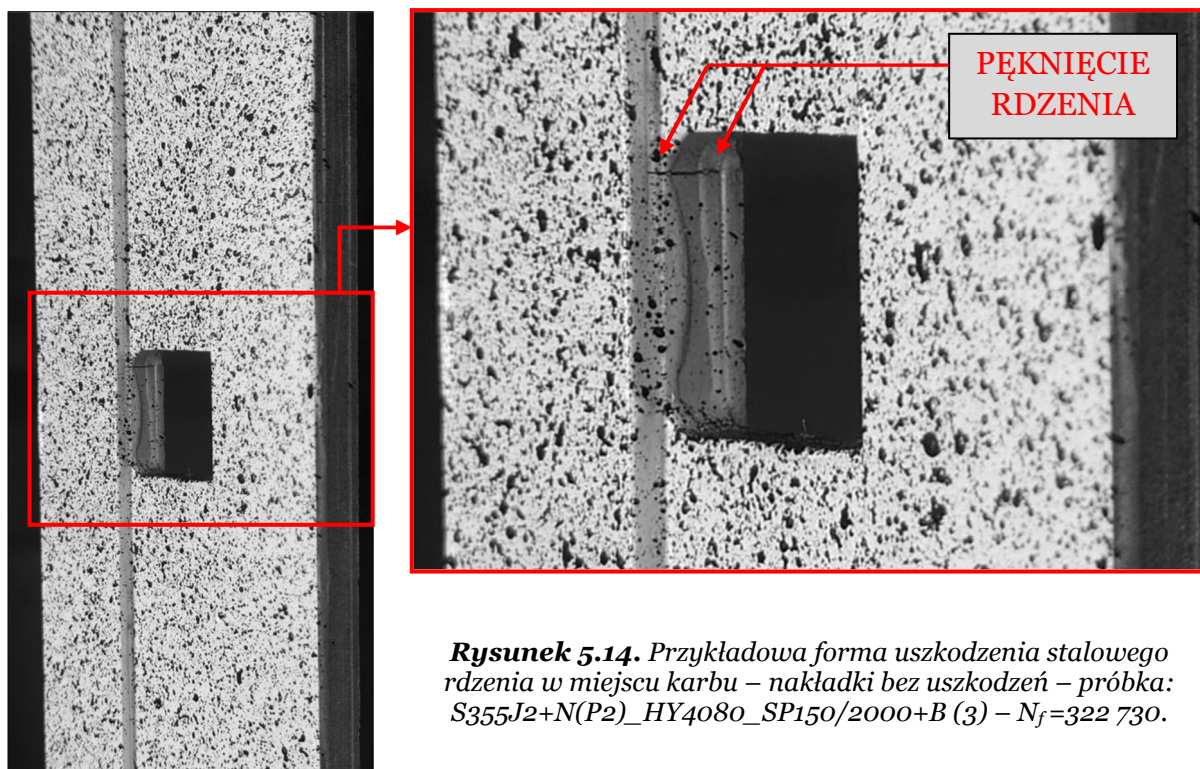


Rysunek 5.12. Wykres $\varepsilon_{TOT} - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo Loctite HY4080GY – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.



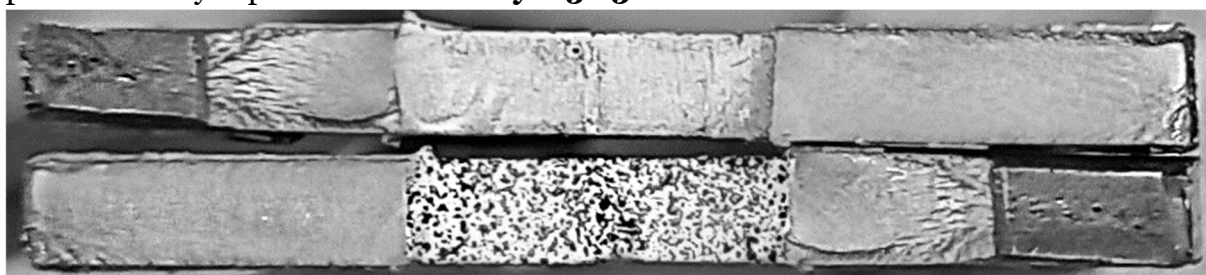
Rysunek 5.13. Wykres $\kappa_i/\kappa_0 - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo Loctite HY4080GY – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

W końcowej fazie badań próbek z zastosowanym klejem HY4080GY we wszystkich przypadkach zaobserwowano pęknięcie rdzenia w miejscu obecności karbu. Należy podkreślić, że od początku badania aż do zniszczenia rdzenia próbki nie było widoczne żadne uszkodzenia pasów wzmacniających ani połączenia klejowego. Można więc wnioskować, że w końcowej fazie zmęczenia nakładki przejmowały znacznie większą część obciążenia z rdzenia aniżeli w przypadkach zastosowań klejów S&P Resin 220 i DP6310NS. Przykładową fotografię powstałego pęknięcia w rdzeniu w końcowej fazie testów zamieszczono na **rys. 5.14**.

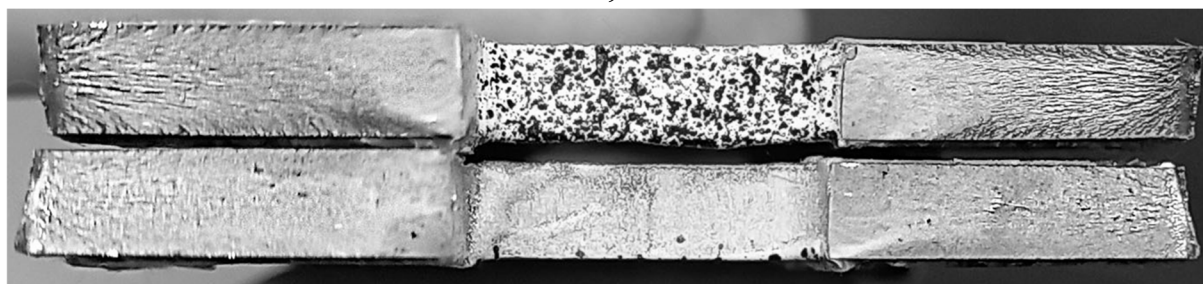


Rysunek 5.14. Przykładowa forma uszkodzenia stalowego rdzenia w miejscu karbu – nakładki bez uszkodzeń – próbka: S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3) – $N_f=322\ 730$.

Zaprezentowane w tej serii testów próbki posiadają zdecydowanie większy udział przelomu zmęczeniowego w formie gładkiej i błyszczącej powierzchni przypominającej drobnoziarnistą strukturę. Należy zauważyć, że przynajmniej po jednej stronie otworu nie występował przelom doraźny (całość stanowi przelom zmęczeniowy – **rys. 5.15.**). Pozostała niewielka część powierzchni zwana strefą resztkową wykazuje rozwinięcie plastyczne, jest matowa i przypomina swoim wyglądem strukturę „gruboziarnistą”. Przykładowe przelomy zmęczeniowe z tej serii próbek zostały zaprezentowane na **rys. 5.15.**



a)



b)

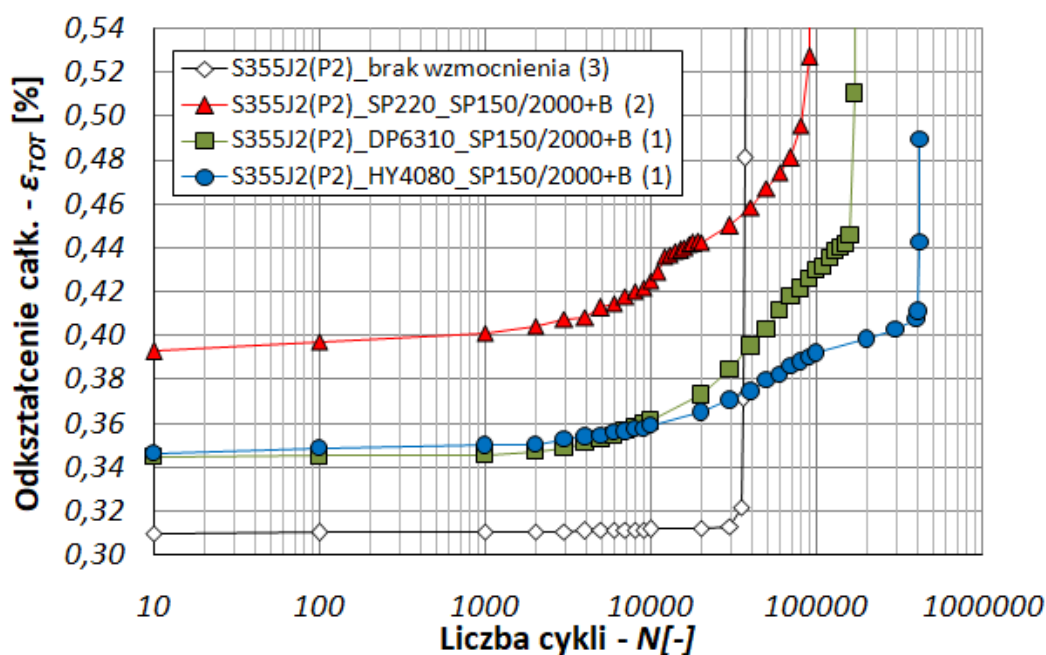
Rysunek 5.15. Przelom zmęczeniowy stalowych elementów z karbem dla spoiwa:
a) Loctite HY4080GY – próbka: S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2) – $N_f=382\ 054$;
b) Loctite HY4080GY – próbka: S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3) – $N_f=322\ 730$.

Przeprowadzone trzy serie badań dla różnych typów klejów dowodzą, iż w dużym stopniu trwałość zmęczeniowa elementów, które zostały wzmocnione nakładkami kompozytowymi (+B) z jednokierunkowego węglowego włókna, zależą od zastosowanego spoiwa. Z analizy własności mechanicznych klejów wynika (**tab. 2.3**), że duże znaczenie mają parametry takie jak moduł Younga (E), odkształcenia maksymalne (ϵ_u) oraz wytrzymałość na ścinanie w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że zastosowanie kleju z niższym modułem Younga oraz większą dopuszczalną wartością odkształcenia maksymalnego (ϵ_u) niweluje efekt odrywania nakładek i zapewnia wyższą trwałość zmęczeniową. Należy natomiast zauważyć, że nie ma bezpośredniego przełożenia wytrzymałości kleju na ścinanie τ_{adh} (statyczne) na trwałość zmęczeniową. Widać to na przykładzie kleju S&P Resin 220, który pomimo najwyższej wytrzymałości na obciążenia statyczne, wykazuje najniższą trwałość zmęczeniową wzmocnionych elementów.

Porównanie uzyskanych wyników dla próbek, które osiągnęły najwyższe wartości trwałości elementów (N_f) dla poszczególnych klejów przedstawiono na wykresie $\epsilon_{TOT} - N$ na **rys. 5.16**.

Podsumowując zaleca się stosowanie kleju HY4080GY do łączenia kompozytowych nakładek wzmacniających do stalowych konstrukcji wykonanych ze stali ciągliwych obciążonych zmęczeniowo. Zapewnia to uzyskanie znaczącego zwiększenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji.

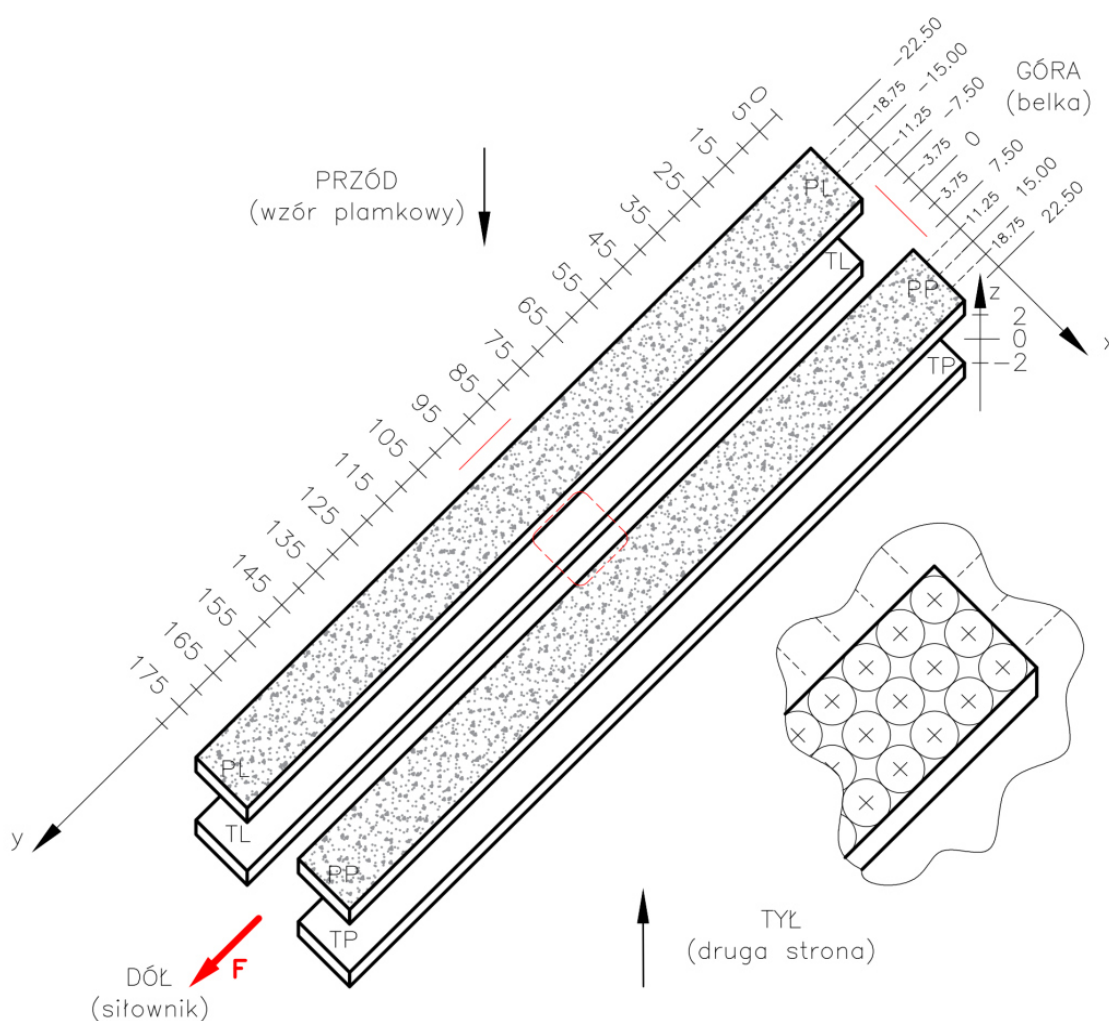


Rysunek 5.16. Porównanie odkształcenia całkowitego (ϵ_{TOT}) w funkcji liczby cykli (N) dla wybranych najwyższych trwałości stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym 15×15 z promieniem zaokrąglenia naroży R_2 wzmocnionych nakładkami kompozytowymi dla wybranych typów klejów strukturalnych – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$ - przy obciążeniu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=0,93$.

5.2. Analiza grubości warstw klejów strukturalnych

Dla wszystkich badanych próbek wykonano pomiary grubości warstw klejów strukturalnych. Pomiary zostały wykonane mikrometrem precyzyjnym WURTH (0-25 mm) z podziałką 0,01 mm i skokiem wrzeciona pomiarowego 0,5 mm. Szczęki urządzenia pomiarowego zostały wykonane z kutej stali, a powierzchnie pomiarowe z węglików spiekanych, które zostały wygładzone i spolerowane. Przed każdą serią pomiarów wykonano sprawdzenie wskazań urządzenia pomiarowego poprzez wykorzystanie wzorca kontrolnego. Każdorazowo pomiar wykonywany był z pokręteł z grzechotką w celu zapewnienia jednakowych nacisków na mierzone powierzchnie.

Pomiary grubości warstwy kleju (t_{adh}) wykonano na całej długości nakładek wzmacniających. Pierwszy pomiar realizowany był w odległości 5mm od krótszego boku nakładki, a każdy kolejny co 10mm wzdłuż nakładki aż do jej końca. W każdym przekroju pomiary (po szerokości nakładki) zrealizowane zostały w trzech miejscach. Schemat wykonywanych pomiarów został przedstawiony na **rys. 5.17**.



Rysunek 5.17. Schemat wykonywanych pomiarów grubości warstwy kleju na próbkach wzmacnionych nakładkami kompozytowymi w formie prostokątnych pasów (+B) wykonanych z jednokierunkowego włókna węglowego S&P C-Laminate 150/2000.

Opisane wyżej pomiary wykonane zostały dla wszystkich badanych próbek ze wzmocnieniem z rozdziału 5.1. Wyniki zestawiono i zamieszczono w **tab. 5.2–5.11**. W tabelach znajdują się wyniki szczegółowych pomiarów wraz z obliczoną średnią wartością grubości warstwy.

Dodatkowo w tabelach oznaczono w formie komentarza kolejność wizualnie zaobserwowanego wystąpienia uszkodzenia wzmocnienia (dla klejów SP220 i DP6310), lub też końcowe uszkodzenia, jeśli wystąpiły one w momencie zniszczenia całej próbki (HY4080). Strony, po których nakładki nie zostały oderwane i nie zidentyfikowano uszkodzeń w trakcie badania posiadają komentarz (KOM.) w postaci pauzy „-”.

Najczęstszym przypadkiem po zniszczeniu było pozostanie spoiwa na nakładce kompozytowej. Zdarzały się również przypadki, w których klej pozostawał na stalowym rdzeniu. Z tego względu grubość warstwy kleju obliczono, jako różnicę grubości danego elementu z pozostałą na nim warstwą kleju a grubością tego elementu (nakładki kompozytowej lub stalowego rdzenia). Przyjęta grubość nakładki kompozytowej wynosiła $t_{ov}=1,45\text{mm}$, a stalowego rdzenia $t_{steel}=4,00\text{ mm}$.

Tabela 5.2. Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (1) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{\max, FAT} = 396 \text{ MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R = 0,1$.

S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (1)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	-			-				-	-			-				-
5	1,58	1,60	1,60	1,43	1,36	1,33	2	0,85	0,84	0,88	0,95	0,99	1,00	-2		
15	1,57	1,46	1,42	1,38	1,34	1,30	2	0,87	0,89	0,95	0,97	1,00	1,03	-2		
25	1,48	1,43	1,38	1,36	1,31	1,25	2	0,91	0,93	1,00	0,98	1,01	1,06	-2		
35	1,46	1,42	1,41	1,23	1,17	1,14	2	0,97	0,97	1,03	1,01	1,05	1,10	-2		
45	1,35	1,40	1,36	1,22	1,18	1,14	2	1,05	1,06	1,11	1,06	1,09	1,13	-2		
55	1,34	1,39	1,35	1,23	1,18	1,14	2	1,07	1,08	1,13	1,11	1,15	1,17	-2		
65	1,42	1,37	1,34	1,24	1,20	1,16	2	1,11	1,11	1,16	1,10	1,14	1,16	-2		
75	1,42	1,37	1,34	1,26	1,21	1,16	2	1,13	1,13	1,18	1,06	1,07	1,13	-2		
85	1,42	1,40	1,36	1,27	1,23	1,18	2	1,14	1,15	1,20	1,08	1,09	1,12	-2		
95	1,42	1,38	1,36	1,31	1,25	1,20	2	1,17	1,18	1,23	1,05	1,08	1,12	-2		
105	1,43	1,39	1,35	1,32	1,27	1,23	2	1,18	1,19	1,25	1,03	1,07	1,14	-2		
115	1,45	1,38	1,35	1,33	1,27	1,24	2	1,20	1,21	1,25	1,02	1,06	1,11	-2		
125	1,45	1,42	1,42	1,36	1,31	1,27	2	1,22	1,23	1,27	1,00	1,04	1,11	-2		
135	1,47	1,40	1,38	1,39	1,33	1,28	2	1,23	1,24	1,30	0,99	1,02	1,08	-2		
145	1,48	1,43	1,39	1,42	1,36	1,31	2	1,23	1,25	1,29	0,98	1,01	1,05	-2		
155	1,50	1,44	1,45	1,47	1,41	1,34	2	1,26	1,26	1,31	0,95	1,00	1,05	-2		
165	1,54	1,50	1,46	1,51	1,45	1,37	2	1,26	1,28	1,32	0,96	0,97	1,05	-2		
175	1,56	1,52	1,46	1,54	1,49	1,42	2	1,26	1,27	1,32	0,89	0,93	1,02	-2		
KOM:	USZKODZENIE 2			USZKODZENIE 2				-	USZKODZENIE 1			USZKODZENIE 1				-
ŚREDNIA	1,46	1,43	1,40	1,35	1,30	1,25	-	1,12	1,13	1,18	1,01	1,04	1,09	-		
	1,43			1,30				-	1,14			1,05				-
	1,36						-	1,09							-	
	1,23							-								-

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.3. Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (2) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (2)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	-			-				-	USZKODZENIE 1			-				-
5	0,94	1,03	1,13	1,50	1,49	1,28	2	0,85	0,82	0,77	0,77	0,85	0,89	-2		
15	0,91	0,99	1,09	1,32	1,21	1,13	2	0,87	0,82	0,78	0,76	0,85	0,91	-2		
25	0,87	0,97	1,08	1,24	1,15	1,02	2	0,84	0,82	0,80	0,77	0,85	0,92	-2		
35	0,88	0,97	1,08	1,23	1,15	1,03	2	0,84	0,82	0,80	0,78	0,85	0,93	-2		
45	0,85	0,97	1,08	1,22	1,12	1,05	2	0,83	0,83	0,81	0,80	0,87	0,93	-2		
55	0,83	0,92	1,01	1,18	1,08	1,01	2	0,86	0,86	0,84	0,81	0,88	0,93	-2		
65	0,76	0,84	0,94	1,12	0,91	0,84	2	0,84	0,86	0,84	0,82	0,88	0,93	-2		
75	0,73	0,83	0,87	1,02	0,93	0,82	2	0,83	0,84	0,85	0,81	0,89	0,95	-2		
85	0,73	0,81	0,89	0,96	0,87	0,80	2	0,84	0,84	0,85	0,83	0,88	0,94	-2		
95	0,72	0,83	0,88	0,98	0,87	0,75	2	0,83	0,83	0,84	0,81	0,89	0,94	-2		
105	0,71	0,81	0,87	0,90	0,86	0,71	2	0,82	0,85	0,83	0,81	0,88	0,92	-2		
115	0,71	0,81	0,88	0,89	0,81	0,71	2	0,80	0,81	0,82	0,79	0,85	0,90	-2		
125	0,73	0,81	0,88	0,86	0,81	0,70	2	0,78	0,81	0,80	0,74	0,81	0,88	-2		
135	0,73	0,84	0,89	0,85	0,83	0,66	2	0,75	0,76	0,77	0,72	0,79	0,84	-2		
145	0,75	0,87	0,91	0,81	0,79	0,68	2	0,73	0,74	0,76	0,71	0,76	0,82	-2		
155	0,76	0,86	0,97	0,84	0,76	0,65	2	0,69	0,70	0,71	0,67	0,71	0,76	-2		
165	0,80	0,86	0,98	0,84	0,75	0,66	2	0,65	0,66	0,67	0,61	0,67	0,73	-2		
175	0,79	0,94	1,04	0,86	0,79	0,72	2	0,64	0,62	0,64	0,59	0,61	0,67	-2		
KOM:	USZKODZENIE 2			USZKODZENIE 2				-	-			USZKODZENIE 1				-
ŚREDNIA	0,79	0,89	0,97	1,03	0,95	0,85	-	0,79	0,79	0,79	0,76	0,82	0,88	-		
	0,88			0,94				-	0,79			0,82				-
	0,91						-	0,80						-		
	0,86							-							-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.4. Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (3) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (3)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	-			USZKODZENIE 1				-	USZKODZENIE 2			USZKODZENIE 2				-
5	0,80	0,74	0,71	0,74	0,75	0,77	2	0,96	0,94	0,91	1,07	1,03	0,98	-2		
15	0,82	0,78	0,77	0,73	0,75	0,79	2	0,89	0,84	0,84	1,00	0,95	0,91	-2		
25	0,84	0,82	0,80	0,78	0,80	0,82	2	0,83	0,79	0,77	0,94	0,89	0,83	-2		
35	0,88	0,86	0,84	0,81	0,82	0,86	2	0,77	0,74	0,72	0,91	0,84	0,80	-2		
45	0,91	0,89	0,88	0,83	0,86	0,88	2	0,74	0,70	0,68	0,84	0,79	0,75	-2		
55	0,95	0,94	0,92	0,86	0,89	0,91	2	0,71	0,67	0,65	0,81	0,76	0,73	-2		
65	0,96	0,93	0,93	0,89	0,91	0,93	2	0,69	0,66	0,65	0,79	0,76	0,73	-2		
75	0,97	0,95	0,94	0,90	0,92	0,94	2	0,70	0,65	0,63	0,79	0,75	0,72	-2		
85	0,99	0,97	0,96	0,92	0,93	0,95	2	0,69	0,65	0,63	0,78	0,76	0,72	-2		
95	1,00	0,97	0,98	0,95	0,95	0,96	2	0,70	0,68	0,65	0,79	0,75	0,72	-2		
105	1,00	0,98	0,97	0,92	0,95	0,95	2	0,75	0,72	0,70	0,78	0,76	0,73	-2		
115	1,00	0,97	0,95	0,91	0,93	0,94	2	0,81	0,78	0,74	0,79	0,77	0,74	-2		
125	0,99	0,97	0,95	0,91	0,92	0,94	2	0,85	0,83	0,88	0,81	0,82	0,78	-2		
135	0,97	0,96	0,94	0,89	0,90	0,92	2	0,93	0,94	0,92	0,86	0,84	0,83	-2		
145	0,96	0,95	0,91	0,87	0,87	0,89	2	0,97	0,96	0,97	0,91	0,87	0,85	-2		
155	0,94	0,92	0,89	0,83	0,84	0,86	2	1,03	1,01	1,01	0,91	0,88	0,84	-2		
165	0,91	0,89	0,87	0,79	0,80	0,83	2	1,12	1,11	1,12	0,96	0,94	0,91	-2		
175	0,89	0,87	0,84	0,76	0,79	0,81	2	1,27	1,26	1,26	1,03	1,00	0,99	-2		
KOM:	USZKODZENIE 1			-				-	-			-				-
ŚREDNIA	0,93	0,91	0,89	0,85	0,87	0,89	-	0,86	0,83	0,82	0,88	0,84	0,81	-		
	0,91			0,87				-	0,83			0,84				-
	0,89							-	0,84							-
	0,86														-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.5. Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (4) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (4)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	$x_1=(-)18.75$	$x_2=(-)15.00$	$x_3=(-)11.25$	$x_4=11.25$	$x_5=15.00$	$x_6=18.75$	$x_7=(-)18.75$		$x_8=(-)15.00$	$x_9=(-)11.25$	$x_{10}=11.25$	$x_{11}=15.00$	$x_{12}=18.75$			
KOM:	USZKODZENIE							USZKODZENIE							-	
5	1.30	1.31	1.41	1.10	1.22	1.30	2	0.88	0.95	0.98	0.54	0.58	0.65	-2		
15	1.22	1.23	1.25	1.02	1.14	1.26	2	0.79	0.87	0.95	0.61	0.64	0.67	-2		
25	1.14	1.14	1.16	0.91	1.04	1.16	2	0.73	0.84	0.93	0.63	0.67	0.73	-2		
35	1.06	1.08	1.11	0.86	0.95	1.08	2	0.75	0.86	0.94	0.67	0.72	0.77	-2		
45	1.00	1.03	1.04	0.79	0.90	1.04	2	0.75	0.84	0.96	0.72	0.76	0.81	-2		
55	0.95	0.97	0.99	0.69	0.88	0.96	2	0.74	0.83	0.97	0.76	0.79	0.84	-2		
65	0.88	0.90	0.96	0.68	0.83	0.93	2	0.76	0.85	0.96	0.81	0.85	0.88	-2		
75	0.84	0.86	0.99	0.65	0.76	0.91	2	0.76	0.84	0.94	0.83	0.86	0.91	-2		
85	0.81	0.82	0.92	0.63	0.75	0.81	2	0.76	0.84	0.94	0.86	0.88	0.95	-2		
95	0.80	0.83	0.87	0.62	0.73	0.83	2	0.78	0.85	0.95	0.89	0.91	0.96	-2		
105	0.84	0.84	0.87	0.60	0.61	0.94	2	0.76	0.84	0.94	0.90	0.92	0.98	-2		
115	0.86	0.86	0.86	0.64	0.71	0.81	2	0.75	0.83	0.90	0.91	0.93	0.99	-2		
125	0.85	0.81	0.88	0.61	0.70	0.82	2	0.75	0.81	0.90	0.91	0.93	0.98	-2		
135	0.88	0.81	0.84	0.63	0.76	0.85	2	0.73	0.81	0.89	0.91	0.94	0.98	-2		
145	0.85	0.88	0.88	0.65	0.76	0.91	2	0.71	0.78	0.88	0.92	0.94	0.98	-2		
155	0.88	0.90	0.93	0.66	0.79	0.91	2	0.69	0.76	0.86	0.92	0.93	0.99	-2		
165	0.93	0.95	1.06	0.71	0.83	0.92	2	0.67	0.73	0.84	0.89	0.92	0.99	-2		
175	1.00	1.03	1.05	0.79	0.92	1.04	2	0.65	0.72	0.83	0.89	0.93	0.98	-2		
KOM:	USZKODZENIE							USZKODZENIE							-	
ŚREDNIA	0.95	0.96	1.00	0.74	0.85	0.97	-	0.75	0.83	0.92	0.81	0.84	0.89	-		
	0.97			0.85				-	0.83			0.85				-
	0.91							-	0.84							-
	0.87														-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.6. Grubości warstw spoiwa DP6310 dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	ODERWANIE 2			ODERWANIE 1				-	-			-				-
5	0,70	0,73	0,73	0,87	0,81	0,73	2	0,85	0,76	0,78	0,89	0,95	1,07	-2		
15	0,69	0,69	0,77	0,89	0,79	0,73	2	0,74	0,71	0,71	0,83	0,91	1,01	-2		
25	0,67	0,72	0,76	0,91	0,83	0,76	2	0,70	0,71	0,66	0,75	0,82	0,87	-2		
35	0,68	0,70	0,74	0,91	0,82	0,76	2	0,65	0,64	0,63	0,69	0,79	0,81	-2		
45	0,69	0,68	0,71	0,94	0,79	0,73	2	0,66	0,61	0,59	0,63	0,74	0,75	-2		
55	0,69	0,70	0,73	0,92	0,83	0,77	2	0,66	0,58	0,53	0,62	0,67	0,69	-2		
65	0,68	0,71	0,74	0,93	0,85	0,77	2	0,64	0,57	0,53	0,63	0,61	0,62	-2		
75	0,70	0,72	0,77	0,93	0,82	0,77	2	0,62	0,56	0,55	0,62	0,56	0,58	-2		
85	0,72	0,73	0,76	0,96	0,86	0,78	2	0,61	0,58	0,56	0,49	0,54	0,57	-2		
95	0,70	0,74	0,80	0,93	0,85	0,78	2	0,64	0,63	0,58	0,51	0,56	0,58	-2		
105	0,70	0,74	0,78	0,93	0,86	0,78	2	0,66	0,62	0,61	0,52	0,53	0,58	-2		
115	0,71	0,75	0,77	0,94	0,86	0,77	2	0,68	0,65	0,63	0,54	0,58	0,60	-2		
125	0,72	0,75	0,78	0,93	0,83	0,75	2	0,71	0,66	0,66	0,56	0,59	0,64	-2		
135	0,74	0,77	0,78	0,95	0,82	0,74	2	0,74	0,71	0,70	0,60	0,62	0,72	-2		
145	0,73	0,77	0,80	0,93	0,83	0,74	2	0,79	0,74	0,78	0,64	0,68	0,72	-2		
155	0,75	0,78	0,81	0,92	0,83	0,73	2	0,81	0,71	0,76	0,69	0,68	0,78	-2		
165	0,77	0,81	0,84	0,93	0,84	0,74	2	0,85	0,82	0,82	0,74	0,78	0,81	-2		
175	0,80	0,84	0,88	0,90	0,81	0,73	2	0,91	0,88	0,86	0,82	0,85	0,89	-2		
KOM:	-			-				-	ODERWANIE 3			ODERWANIE 4				-
ŚREDNIA	0,71	0,74	0,78	0,92	0,83	0,75	-	0,72	0,67	0,66	0,65	0,69	0,74	-		
	0,74			0,84				-	0,69			0,69				-
	0,79							-	0,69							-
	0,74														-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.7. Grubości warstw spoiwa DP6310 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (2) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (2)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	-			-				-	-			ODERWANIE 2				-
5	0.44	0.39	0.36	0.40	0.42	0.47	2	0.49	0.50	0.56	0.55	0.51	0.51	-2		
15	0.45	0.39	0.36	0.39	0.41	0.49	2	0.45	0.49	0.51	0.53	0.50	0.47	-2		
25	0.44	0.39	0.36	0.39	0.42	0.51	2	0.45	0.47	0.49	0.51	0.48	0.47	-2		
35	0.46	0.41	0.37	0.41	0.43	0.50	2	0.43	0.45	0.48	0.50	0.46	0.44	-2		
45	0.45	0.39	0.37	0.39	0.44	0.52	2	0.41	0.43	0.50	0.48	0.45	0.44	-2		
55	0.50	0.41	0.37	0.41	0.42	0.52	2	0.41	0.45	0.48	0.47	0.45	0.43	-2		
65	0.51	0.40	0.38	0.42	0.43	0.52	2	0.42	0.44	0.46	0.47	0.44	0.41	-2		
75	0.52	0.41	0.35	0.45	0.46	0.53	2	0.40	0.44	0.50	0.45	0.42	0.40	-2		
85	0.52	0.41	0.38	0.45	0.49	0.52	2	0.40	0.43	0.49	0.43	0.42	0.41	-2		
95	0.50	0.45	0.42	0.43	0.49	0.53	2	0.41	0.44	0.47	0.43	0.41	0.39	-2		
105	0.44	0.41	0.39	0.43	0.48	0.53	2	0.42	0.46	0.48	0.44	0.42	0.38	-2		
115	0.44	0.41	0.38	0.42	0.46	0.52	2	0.44	0.47	0.53	0.42	0.39	0.38	-2		
125	0.45	0.41	0.38	0.41	0.44	0.53	2	0.47	0.49	0.55	0.41	0.39	0.37	-2		
135	0.46	0.40	0.38	0.39	0.42	0.49	2	0.49	0.52	0.57	0.40	0.39	0.37	-2		
145	0.44	0.40	0.39	0.37	0.42	0.46	2	0.54	0.56	0.63	0.40	0.39	0.37	-2		
155	0.45	0.41	0.38	0.36	0.39	0.44	2	0.59	0.62	0.66	0.42	0.40	0.38	-2		
165	0.46	0.41	0.38	0.34	0.38	0.42	2	0.65	0.67	0.71	0.41	0.40	0.38	-2		
175	0.45	0.38	0.36	0.32	0.36	0.40	2	0.72	0.73	0.75	0.42	0.40	0.39	-2		
KOM:	ODERWANIE 3			ODERWANIE 3				-	ODERWANIE 1			-				-
ŚREDNIA	0.47	0.40	0.38	0.40	0.43	0.49	-	0.48	0.50	0.55	0.45	0.43	0.41	-		
	0.42			0.44				-	0.51			0.43				-
	0.43							-	0.47							-
	0.45														-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.8. Grubości warstw spoiwa DP6310 dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	ODERWANIE 1			ODERWANIE 2				X	ODERWANIE 3			X				
5	0.56	0.53	0.52	0.53	0.47	0.43	2	1.08	1.16	1.20	0.83	0.94	1.00	-2		
15	0.52	0.51	0.49	0.55	0.46	0.38	2	1.04	1.11	1.15	0.77	0.85	0.92	-2		
25	0.51	0.50	0.55	0.55	0.46	0.37	2	0.95	1.04	1.11	0.73	0.80	0.85	-2		
35	0.49	0.48	0.50	0.60	0.49	0.36	2	0.91	0.98	1.05	0.69	0.76	0.80	-2		
45	0.48	0.48	0.48	0.58	0.49	0.38	2	0.86	0.94	1.00	0.64	0.72	0.77	-2		
55	0.47	0.47	0.49	0.59	0.51	0.40	2	0.82	0.91	0.97	0.62	0.68	0.74	-2		
65	0.45	0.46	0.51	0.58	0.50	0.40	2	0.79	0.84	0.94	0.60	0.66	0.73	-2		
75	0.45	0.46	0.52	0.60	0.52	0.42	2	0.75	0.80	0.92	0.59	0.63	0.68	-2		
85	0.44	0.44	0.52	0.62	0.54	0.43	2	0.71	0.76	0.86	0.55	0.62	0.68	-2		
95	0.43	0.43	0.43	0.61	0.55	0.46	2	0.70	0.74	0.83	0.54	0.61	0.66	-2		
105	0.41	0.41	0.42	0.66	0.55	0.43	2	0.68	0.73	0.81	0.58	0.61	0.66	-2		
115	0.40	0.41	0.41	0.63	0.57	0.47	2	0.65	0.72	0.80	0.55	0.62	0.64	-2		
125	0.39	0.39	0.42	0.65	0.59	0.47	2	0.63	0.70	0.76	0.55	0.61	0.67	-2		
135	0.38	0.39	0.39	0.65	0.57	0.46	2	0.62	0.69	0.75	0.56	0.60	0.73	-2		
145	0.38	0.38	0.39	0.67	0.56	0.49	2	0.62	0.61	0.75	0.56	0.61	0.70	-2		
155	0.38	0.38	0.39	0.68	0.59	0.51	2	0.58	0.61	0.73	0.59	0.62	0.68	-2		
165	0.38	0.39	0.41	0.69	0.52	0.52	2	0.56	0.63	0.73	0.60	0.66	0.71	-2		
175	0.39	0.41	0.40	0.70	0.49	0.48	2	0.63	0.67	0.72	0.62	0.70	0.76	-2		
KOM:	X			X				X	X			ODERWANIE 4				

ŚREDNIA	0.44	0.44	0.46	0.62	0.52	0.44	-	0.75	0.81	0.89	0.62	0.68	0.74	-		
	0.45			0.53				-	0.82			0.68				-
	0.49							-	0.75							-
	0.62														-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.9. Grubości warstw spoiwa Loctite HY4080GY dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (1) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (1)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	ODERWANIE			ODERWANIE				-	ODERWANIE			-				-
5	0,69	0,70	0,63	0,66	0,72	0,75	2	0,31	0,39	0,46	0,20	0,20	0,20	-2		
15	0,61	0,55	0,56	0,57	0,60	0,65	2	0,34	0,42	0,48	0,25	0,23	0,22	-2		
25	0,54	0,49	0,49	0,50	0,54	0,58	2	0,40	0,48	0,54	0,29	0,26	0,26	-2		
35	0,48	0,45	0,44	0,45	0,51	0,52	2	0,41	0,48	0,58	0,32	0,29	0,29	-2		
45	0,45	0,39	0,38	0,41	0,44	0,47	2	0,44	0,50	0,60	0,33	0,31	0,31	-2		
55	0,41	0,37	0,35	0,38	0,40	0,43	2	0,46	0,52	0,62	0,31	0,31	0,32	-2		
65	0,40	0,34	0,33	0,35	0,38	0,41	2	0,48	0,54	0,66	0,32	0,36	0,35	-2		
75	0,36	0,34	0,31	0,34	0,37	0,39	2	0,50	0,57	0,65	0,32	0,36	0,35	-2		
85	0,38	0,33	0,32	0,34	0,35	0,38	2	0,49	0,58	0,65	0,32	0,36	0,35	-2		
95	0,37	0,34	0,33	0,38	0,40	0,40	2	0,49	0,56	0,65	0,34	0,35	0,34	-2		
105	0,39	0,36	0,35	0,38	0,39	0,43	2	0,48	0,57	0,63	0,36	0,35	0,33	-2		
115	0,41	0,40	0,41	0,37	0,46	0,48	2	0,45	0,55	0,61	0,34	0,33	0,32	-2		
125	0,46	0,43	0,43	0,40	0,42	0,47	2	0,43	0,55	0,60	0,33	0,32	0,30	-2		
135	0,54	0,50	0,48	0,47	0,49	0,52	2	0,42	0,52	0,58	0,30	0,29	0,28	-2		
145	0,59	0,56	0,54	0,58	0,57	0,57	2	0,41	0,51	0,55	0,27	0,27	0,25	-2		
155	0,69	0,65	0,60	0,59	0,62	0,65	2	0,38	0,48	0,51	0,24	0,23	0,21	-2		
165	0,76	0,74	0,70	0,70	0,72	0,75	2	0,34	0,43	0,49	0,20	0,18	0,17	-2		
175	0,89	0,84	0,80	0,77	0,82	0,88	2	0,31	0,40	0,49	0,14	0,13	0,12	-2		
KOM:	-			-				-	-			ODERWANIE				-
ŚREDNIA	0,52	0,49	0,47	0,48	0,51	0,54	-	0,42	0,50	0,58	0,29	0,28	0,27	-		
	0,49			0,51				-	0,50			0,28				-
	0,50							-	0,39							-
	0,45														-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.10. Grubości warstw spoiwa Loctite HY4080GY dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	-			ODERWANIE				-	-			-				-
5	0,33	0,29	0,25	0,23	0,26	0,36	2	0,36	0,29	0,25	0,33	0,34	0,36	-2		
15	0,32	0,28	0,25	0,24	0,28	0,34	2	0,30	0,28	0,25	0,32	0,30	0,33	-2		
25	0,32	0,27	0,22	0,24	0,28	0,33	2	0,32	0,27	0,22	0,29	0,30	0,31	-2		
35	0,31	0,26	0,22	0,24	0,29	0,32	2	0,31	0,26	0,22	0,25	0,27	0,29	-2		
45	0,31	0,24	0,22	0,25	0,29	0,34	2	0,31	0,24	0,22	0,24	0,25	0,26	-2		
55	0,31	0,24	0,23	0,25	0,29	0,34	2	0,31	0,24	0,23	0,22	0,23	0,25	-2		
65	0,29	0,24	0,21	0,25	0,28	0,36	2	0,29	0,24	0,21	0,20	0,22	0,25	-2		
75	0,28	0,24	0,23	0,27	0,30	0,35	2	0,28	0,24	0,23	0,17	0,19	0,22	-2		
85	0,24	0,22	0,22	0,29	0,29	0,36	2	0,26	0,22	0,22	0,16	0,20	0,25	-2		
95	0,28	0,23	0,19	0,32	0,31	0,39	2	0,28	0,23	0,19	0,17	0,20	0,25	-2		
105	0,31	0,23	0,23	0,33	0,29	0,38	2	0,29	0,23	0,23	0,18	0,21	0,25	-2		
115	0,28	0,23	0,18	0,32	0,30	0,36	2	0,28	0,23	0,18	0,18	0,22	0,22	-2		
125	0,29	0,23	0,19	0,30	0,30	0,35	2	0,29	0,23	0,19	0,20	0,25	0,26	-2		
135	0,35	0,23	0,21	0,29	0,30	0,37	2	0,29	0,23	0,20	0,22	0,26	0,29	-2		
145	0,37	0,31	0,26	0,30	0,32	0,38	2	0,28	0,22	0,21	0,23	0,25	0,28	-2		
155	0,39	0,31	0,27	0,29	0,33	0,40	2	0,27	0,22	0,20	0,22	0,28	0,29	-2		
165	0,38	0,33	0,27	0,30	0,36	0,42	2	0,27	0,22	0,20	0,25	0,26	0,30	-2		
175	0,38	0,33	0,29	0,31	0,38	0,45	2	0,26	0,23	0,22	0,26	0,29	0,31	-2		
KOM:	ODERWANIE			-				-	ODERWANIE			ODERWANIE				-
ŚREDNIA	0,32	0,26	0,23	0,28	0,30	0,37	-	0,29	0,24	0,21	0,23	0,25	0,28	-		
	0,27			0,32				-	0,25			0,25				-
	0,29							-	0,25							-
	0,27														-	

*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Tabela 5.11. Grubości warstw spoiwa Loctite HY4080GY dla próbki z otworem kwadratowym 15×15 ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.

S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3)																
y	PRZÓD							TYŁ								
	LEWY (PL)			PRAWY (PP)				z	LEWY (TL)			PRAWY (TP)				z
	x ₁ =(-)18.75	x ₂ =(-)15.00	x ₃ =(-)11.25	x ₄ =11.25	x ₅ =15.00	x ₆ =18.75	x ₇ =(-)18.75		x ₈ =(-)15.00	x ₉ =(-)11.25	x ₁₀ =11.25	x ₁₁ =15.00	x ₁₂ =18.75			
KOM:	-			-				-	ODERWANIE			ODERWANIE				-
5	0,29	0,33	0,39	0,28	0,27	0,25	2	0,39	0,36	0,29	0,48	0,50	0,51	-2		
15	0,27	0,34	0,42	0,27	0,25	0,22	2	0,36	0,31	0,28	0,43	0,41	0,44	-2		
25	0,30	0,36	0,43	0,26	0,25	0,21	2	0,33	0,32	0,26	0,39	0,37	0,41	-2		
35	0,31	0,36	0,44	0,25	0,25	0,21	2	0,25	0,27	0,17	0,35	0,34	0,34	-2		
45	0,31	0,38	0,45	0,25	0,24	0,24	2	0,26	0,25	0,17	0,33	0,31	0,31	-2		
55	0,32	0,38	0,46	0,27	0,25	0,26	2	0,21	0,23	0,19	0,30	0,28	0,30	-2		
65	0,34	0,39	0,45	0,29	0,27	0,29	2	0,21	0,22	0,16	0,29	0,27	0,28	-2		
75	0,33	0,39	0,46	0,31	0,29	0,31	2	0,22	0,23	0,19	0,29	0,28	0,29	-2		
85	0,31	0,38	0,43	0,33	0,31	0,30	2	0,24	0,24	0,27	0,29	0,27	0,31	-2		
95	0,35	0,40	0,44	0,31	0,30	0,30	2	0,23	0,23	0,28	0,29	0,27	0,28	-2		
105	0,34	0,38	0,43	0,29	0,32	0,29	2	0,27	0,24	0,29	0,28	0,29	0,29	-2		
115	0,33	0,35	0,45	0,28	0,30	0,28	2	0,27	0,25	0,27	0,31	0,30	0,30	-2		
125	0,33	0,37	0,43	0,29	0,27	0,27	2	0,27	0,26	0,21	0,31	0,29	0,30	-2		
135	0,30	0,36	0,44	0,31	0,30	0,27	2	0,29	0,26	0,24	0,34	0,31	0,33	-2		
145	0,31	0,36	0,44	0,32	0,29	0,27	2	0,30	0,28	0,26	0,35	0,34	0,36	-2		
155	0,29	0,36	0,44	0,32	0,30	0,26	2	0,38	0,31	0,29	0,37	0,37	0,39	-2		
165	0,28	0,36	0,45	0,35	0,34	0,26	2	0,39	0,34	0,32	0,42	0,42	0,44	-2		
175	0,29	0,34	0,43	0,36	0,34	0,29	2	0,41	0,39	0,38	0,46	0,49	0,50	-2		
KOM:	ODERWANIE			ODERWANIE				-	-			-				-
ŚREDNIA	0,31	0,37	0,44	0,30	0,29	0,27	-	0,29	0,28	0,25	0,35	0,34	0,35	-		
	0,37			0,28				-	0,27			0,35				-
	0,33							-	0,31							-
	0,32														-	

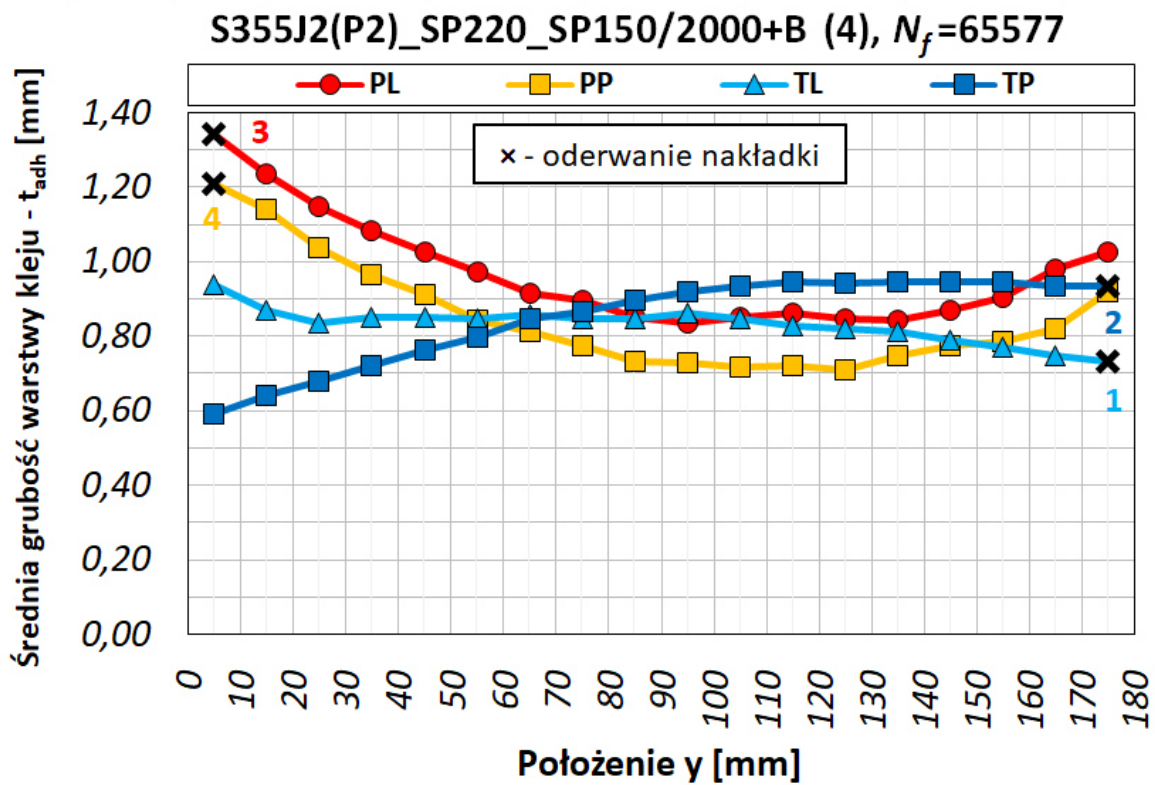
*Wartości zawarte w tabeli podane w [mm]

Na podstawie zaprezentowanych wyników pomiarów grubości warstw klejów dla indywidualnych próbek (**tab. 5.2.–5.11.**) sporządzona została tabela zbiorcza (**tab 5.12.**) z uśrednionymi wartościami grubości kleju. Wartości w tabeli zbiorczej podano dla przedniej i tylnej części próbki (uśredniając dla dwóch pasów wzmacniających) oraz wynik uśredniony dla całości elementu. Z zaprezentowanego zestawienia można zauważyć, że dla spoiwa S&P Resin 220 najwyższą trwałość zmęczeniową uzyskano dla średniej wartości $\bar{t}_{adh}=0,86\text{mm}$ i jest to najniższa wartość średniej warstwy kleju z wszystkich tego typu próbek. W przypadku spoiwa 3M Scotch Weld DP6310NS najwyższą trwałość zmęczeniową uzyskano dla średniej warstwy kleju o grubości $\bar{t}_{adh}=0,74\text{mm}$ i jest to najwyższa wartość grubości spośród badanych próbek z tym klejem. Dla spoiwa Loctite HY4080GY najwyższą trwałość została uzyskana dla średniej grubości kleju $\bar{t}_{adh}=0,45\text{mm}$ – czyli dla próbki o największej grubości spoiny klejowej dla tego kleju.

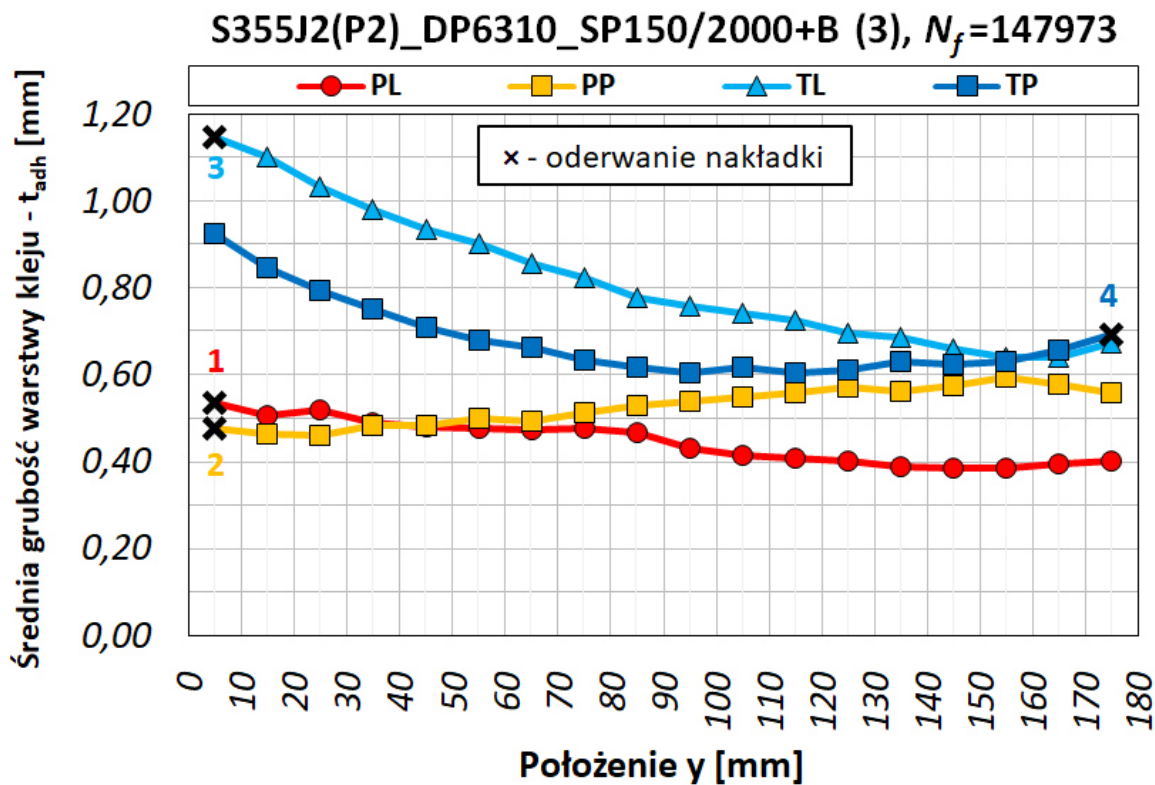
Tabela 5.12. Zestawienie zbiorcze grubości warstw klejów dla wszystkich badanych próbek S355J2+N z otworem kwadratowym $15 \times 15 \text{ R2}$ z wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B dla wybranych typów spoiwa przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{\max, \text{FAT}}=396 \text{ MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$ – przy obciążeniu $\sigma_{\max, \text{FAT}}/Y_{eH}=0,93$.

Rodzaj spoiwa		Liczba cykli	Średnia grubość warstwy kleju - t_{adh}			\bar{t}_{adh}
			Przód próbki (PP+PL)	Tył próbki (TP+TL)	Przód+Tył (PP+PL+TP+TL)	
[-]	LP	N_f [-]	\bar{t}_{adh} [mm]			
S&P Resin 220	(1)	56 283	1,36	1,09	1,23	0,955
	(2)	94 423	0,91	0,80	0,86	
	(3)	82 170	0,89	0,84	0,86	
	(4)	65 557	0,91	0,84	0,87	
3M Scotch Weld DP6310NS	(1)	172 184	0,79	0,69	0,74	0,603
	(2)	143 258	0,43	0,47	0,45	
	(3)	147 973	0,49	0,75	0,62	
Loctite HY 4080 GY	(1)	421 741	0,50	0,39	0,45	0,347
	(2)	382 054	0,29	0,25	0,27	
	(3)	322 730	0,33	0,31	0,32	

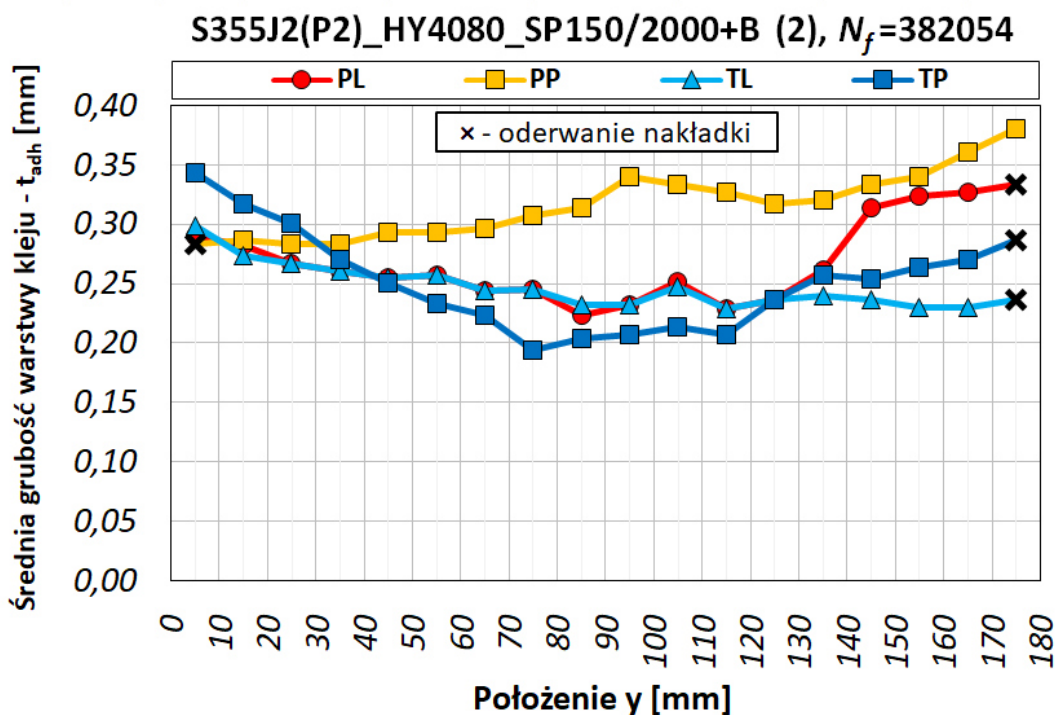
Dla każdej z serii testów poszczególnych klejów pokazano przebiegi uśrednionej grubości warstwy kleju dla wybranych próbek – **rys. 5.18–5.20**. Z przedstawionych wykresów można zauważyć, że rozkład grubości spoiwa w przeważającej części przypomina dopasowanie do funkcji kwadratowej – jest to jedna z wad metody klejenia ręcznego, którą można wyeliminować poprzez zautomatyzowanie procesu i zaprojektowanie odpowiednich szablonów [140]. Z drugiej strony klejenie ręczne jest najprostszą metodą naklejania nakładek wzmacniających w czasie napraw w warunkach poligonowych. Na wykresach zaznaczono także kolejność odrywania nakładek oraz stronę po której nastąpiło oderwanie. Dla przypadków odrywania zakończeń nakładek za kolejnością przyjęto oznaczenia w formie cyfr (1,2,3,4), w przypadku jednoczesnego oderwania oznaczenie jest podwójne (1,1,2,2), natomiast tam gdzie do końca badania nie zaobserwowano oderwania nakładek numerację pominięto.



Rysunek 5.18. Rozkład uśrednionej grubości warstwy kleju dla próbki $S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (4), N_f=65\ 577$.



Rysunek 5.19. Rozkład uśrednionej grubości warstwy kleju dla próbki $S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3), N_f=147\ 973$.



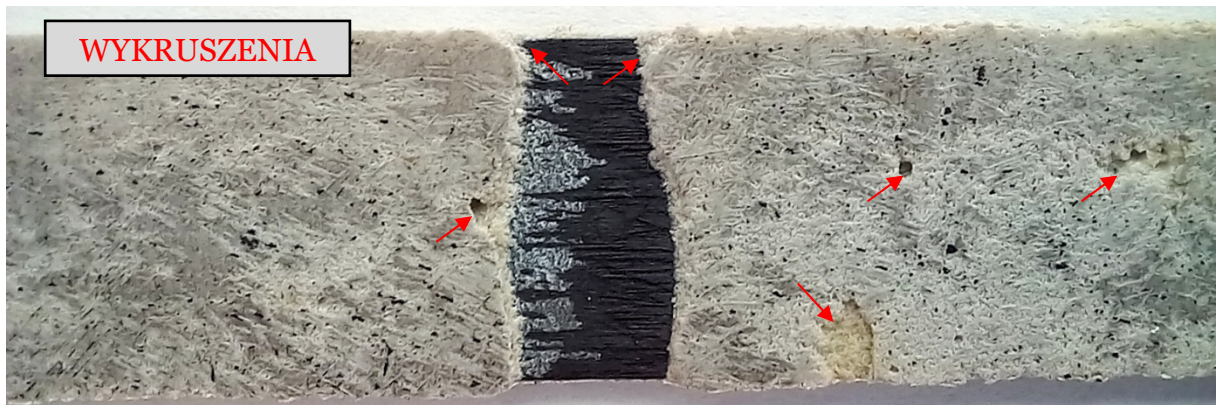
Rysunek 5.20. Rozkład uśrednionej grubości warstwy kleju dla próbek $S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2), N_f=382054$.

Dla każdego z klejów strukturalnych uszkodzenia przyjmowały inną formę – przypadki te zostały przedstawione na **rys. 5.21**.

Dla kleju S&P Resin 220 (**rys. 5.21.a,b**) uszkodzenia przybierały kruchą formę. Na zniszczonym połączeniu (po zakończeniu testów zmęczeniowych) wyraźnie widoczne były wykruszenia kleju. Zaobserwowano dwie formy zniszczenia adhezyjnego od powierzchni stalowej. W pierwszym przypadku dochodziło do całkowitego oderwania się kleju od stali – klej pozostawał na kompozytowej nakładce (**rys. 5.21a**), gdzie można było zaobserwować widoczne ubytki. Dodatkowo w miejscach gdzie klej ulegał degradacji nastąpiła zmiana odcienia powierzchni kleju z jasnoszarego na ciemnoszary. W drugim przypadku na stali pozostawała cienka warstwa kleju z miejscowymi grubszymi wtrąceniami (**rys. 5.21b**).

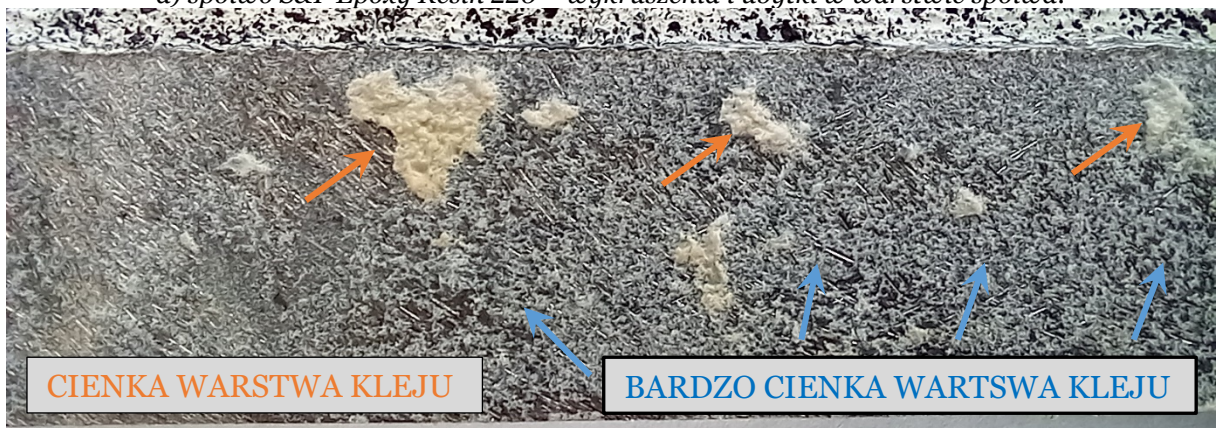
W przypadku kleju 3M Scotch-Weld DP6310DS (**rys. 5.21.c**) uszkodzeniu kleju towarzyszy zmiana odcienia zabarwienia z ciemnozielonego na jasnozielony. Uszkodzenia związane z wyraźnymi pęknięciami i rozwarstwieniami kleju. Ponadto zauważono, że świeżo wykonana warstwa kleju wykazuje się dużą elastycznością, natomiast po procesie zmęczenia w miejscach uszkodzeń klej staje się twardy i ma popękaną strukturę.

W kleju strukturalnym Loctite HY4080GY (**rys. 5.21.d**) wystąpiły pęknięcia propagujące się wszerek próbki – prostopadle do zadawanego obciążenia. Na zaprezentowanym zdjęciu widoczna jest strefa w pobliżu otworu. Pęknięcia te mają wyraźnie jaśniejszy odcień, i są ułożone na całym przekroju w miejscu degradacji. Ponadto świeżo wykonana warstwa kleju cechuje się wysoką lepkością i elastycznością – natomiast po teście zmęczeniowym część powierzchni, która uległa degradacji jest twarda podobnie jak w przypadku kleju 3M Scotch-Weld DP6310NS.



WYKRUSZENIA

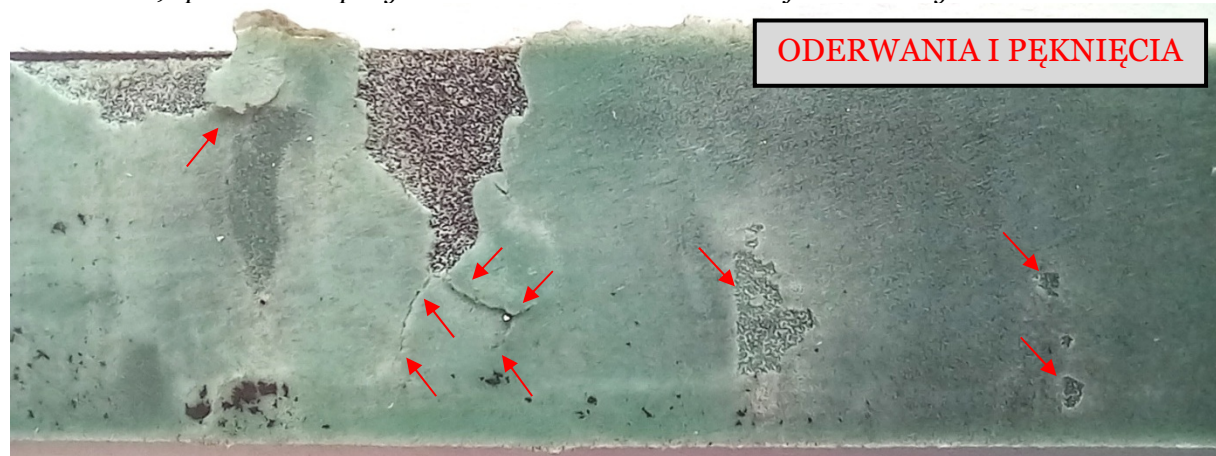
a) spoiwo S&P Epoxy Resin 220 – wykruszenia i ubytki w warstwie spoiwa.



CIENKA WARSTWA KLEJU

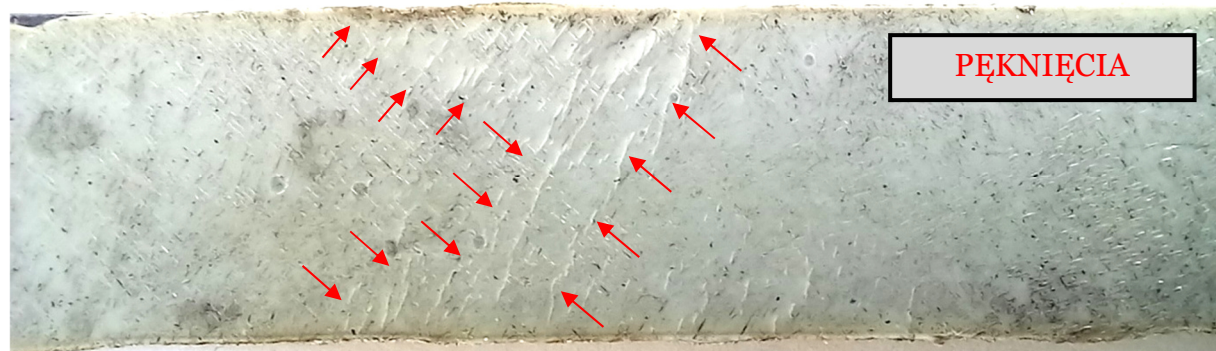
BARDZO CIENKA WARTSWA KLEJU

b) spoiwo S&P Epoxy Resin 220 – cienka warstwa kleju na stalowym rdzeniu.



ODERWANIA I PĘKNIĘCIA

c) spoiwo 3M Sctoch-Weld DP6310DS – oderwania i pęknięcia spoiwa.



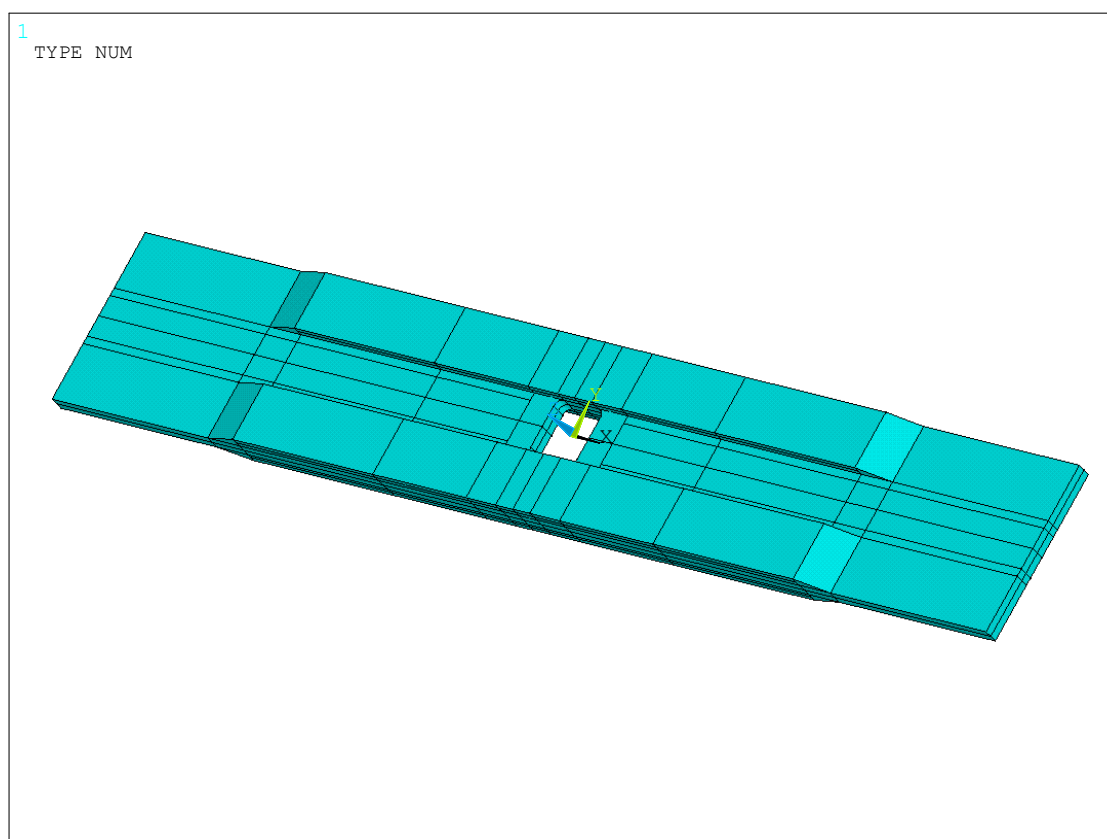
PĘKNIĘCIA

d) spoiwo Loctite HY4080GY – pęknięcia na powierzchni spoiwa.

Rysunek 5.21. Wybrane fotografie ukazujące charakter zniszczenia spoiwa.

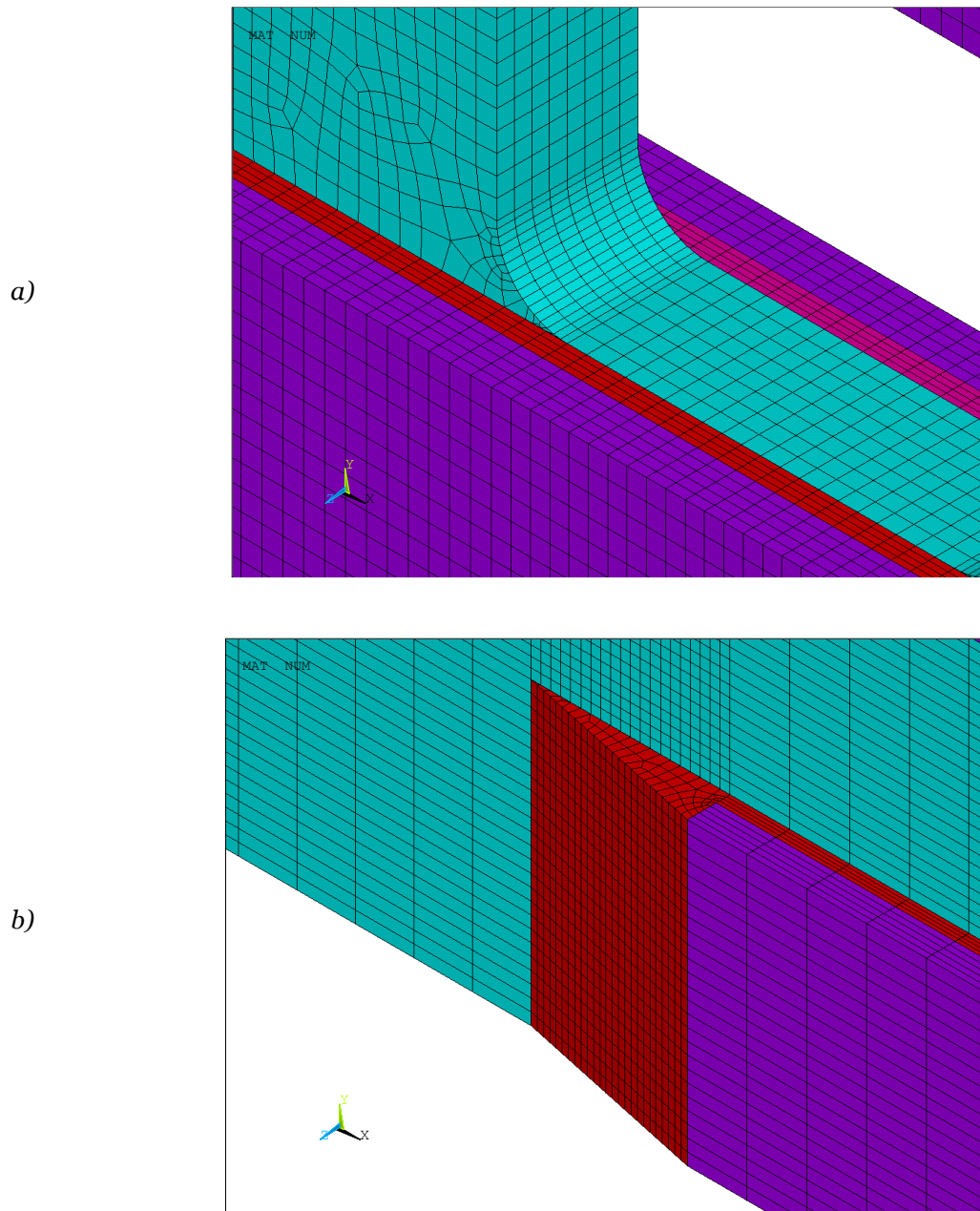
5.3. Numeryczny model MES badanej próbki ze wzmocnieniem typu +B

W odróżnieniu od modelowania numerycznego zastosowanego w rozdziale 4, gdzie do rozwiązania wykorzystano elementy powłokowe SHELL181, w poniższych analizach wykorzystano modelowanie za pomocą elementów bryłowych (3D) – SOLID185. Za pomocą tego elementu można modelować zarówno materiały izotropowe jak i ortotropowe (kompozyty). Taki sposób modelowania geometrii próbki pozwala na uwzględnienie różnej grubości kleju pod poszczególnymi nakładkami, przy czym pod każdą z nakładek grubość kleju traktowano jako wartość stałą. Przeprowadzone testy numeryczne pozwoliły na dopasowanie rozmiaru elementu do analizowanego problemu – uwzględnienia efektu karbu oraz wpływu skośnego zakończenia spoiny klejowej. Modelowanie rozpoczęto od generacji powtarzalnej $\frac{1}{4}$ części rdzenia, a następnie poprzez lustrzane odbicie uzyskano cały rdzeń na którym wygenerowano objętości kleju oraz nakładek wzmacniających. Na końcu wygenerowano skośne zakończenia sklein. Finalnie pozwoliło to na uzyskanie symetrycznej siatki elementów skończonych, co daje zachowanie symetrii w uzyskanych rozwiązaniach (przy symetrycznym obciążeniu i warunkach brzegowych). Ostatecznie do analizy przyjęto siatkę z liczbą około 210 tysięcy węzłów i ponad 630 tysięcy równań do rozwiązania. Całą zamodelowaną próbkę pokazuje **rys.5.22.**



Rysunek 5.22. Geometryczny model elementu z nakładkami w formie pasów wzmacniających (+B).

Z uwagi na dużą gęstość zastosowanej siatki elementów skończonych szczegółowo przedstawiono fragment siatki zastosowanej w otoczeniu karbu oraz jedno ze skośnych zakończeń skleiny (**rys.5.23**).



Rysunek 5.23. Fragment siatki elementów skończonych: a) w otoczeniu karbu; b) przy zakończeniu uskowania spoiny klejowej.

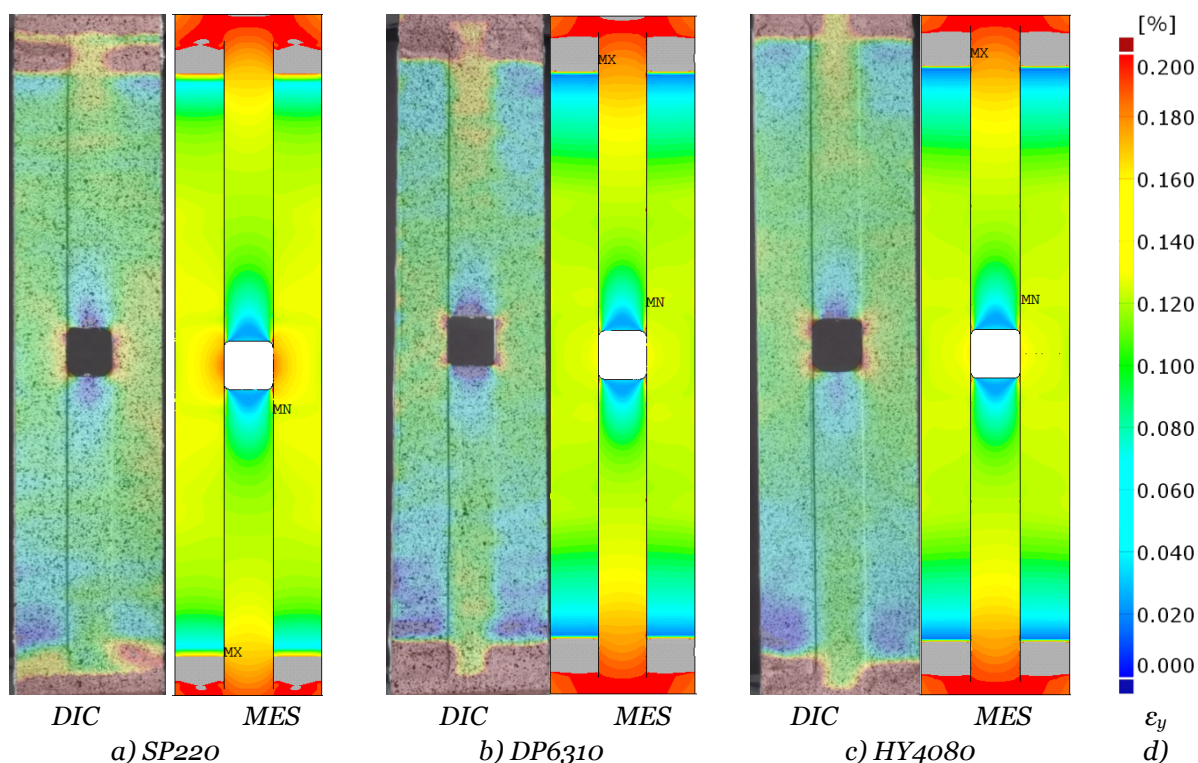
Na rysunku powyżej kolorem czerwonym zaznaczono materiał kleju, kolor fioletowy przypisano elementom skończonym nakładki a kolor niebieski zarezerwowano dla materiału rdzenia. Dla tak zdefiniowanego modelu przeprowadzono analizy *MES* dla trzech rodzajów badanych klejów i średnich grubości sklein podanych w **tab. 5.12**.

5.4. Dyskusja otrzymanych wyników badań zmęczeniowych i numerycznych

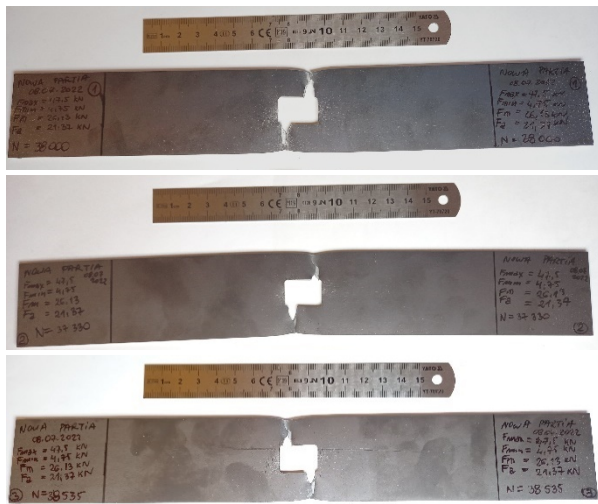
W celu określenia czynników wpływających na trwałość badanego połączenia przeprowadzono stosowne obliczenia numeryczne za pomocą metody elementów skończonych (MES). Model numeryczny zweryfikowany został w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych z użyciem cyfrowej korelacji obrazu. W związku z tym, że analiza MES wykonana została dla obciążenia statycznego, wynik MES porównano z analizą DIC dla maksymalnej siły $F_{max}=47,5\text{kN}$ dla $N=0,25$ cykla (statyczne rozciąganie do wartości maksymalnej). Zdjęcia oraz analizy wykonano dla próbek w których zastosowano trzy różne kleje – S&P Resin 220, DP6310NS i HY4080GY.

Na podstawie wykonanych badań uzyskano satysfakcjonującą zgodność wyników MES z wynikami analiz DIC (rys. 5.24.). Pewne różnice zaobserwowano w kształcie koncentracji odkształceń na kompozytowych nakładkach. Na warstwicach otrzymanych z DIC widoczne były cztery lokalne koncentracje w miejscach w których występują karby zmęczeniowe (w rdzeniu). Na rys. 5.24 zamieszczono porównanie rozkładów odkształceń dla obciążenia statycznego na powierzchniach próbek otrzymanych z DIC (na zdjęciach widoczna jest cała próbka poza miejscem jej mocowania w uchwytach maszyny). Uzyskane wyniki zasadniczo nie różnią się od siebie.

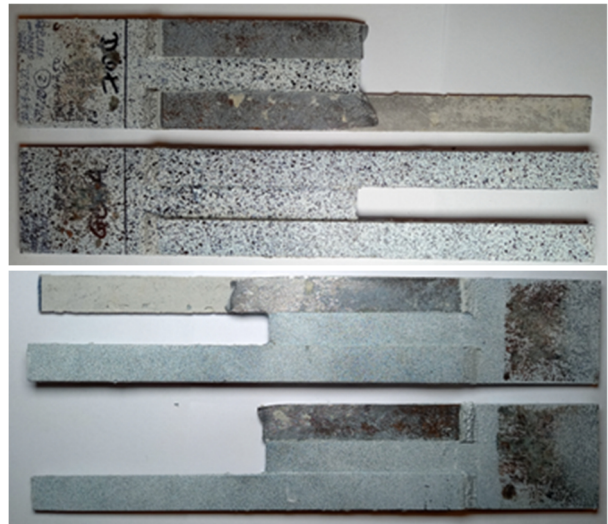
Istotne różnice w zachowaniu się poszczególnych klejów wystąpiły natomiast podczas testów zmęczeniowych. We wszystkich przebadanych próbkach zniszczenie



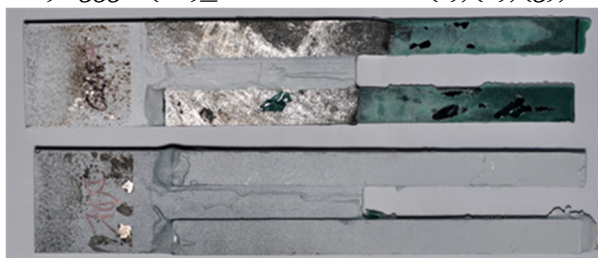
Rysunek 5.24. Wybrane elementy z otworami z dwustronnym wzmocnieniem w postaci pasów wykonanych z taśmy SP150/2000 (CFRP) dla różnych typów spoiwa przy obciążeniu $F_{max}=47,5\text{ kN}$:
a) S355J2(P2)_SP220_SP150/2000+B (3); b) S355J2(P2)_DP6310_SP150/2000+B (2);
c) S355J2(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2); d) odkształcenie ε_y [%].



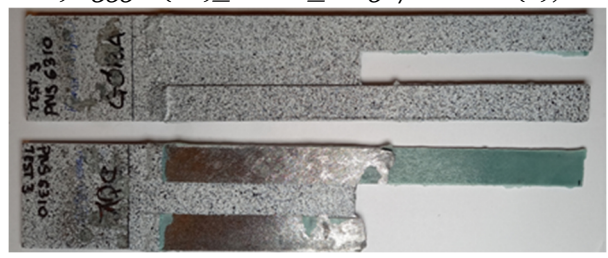
a) S355J2(P2)_bez wzmocnienia (1), (2), (3);



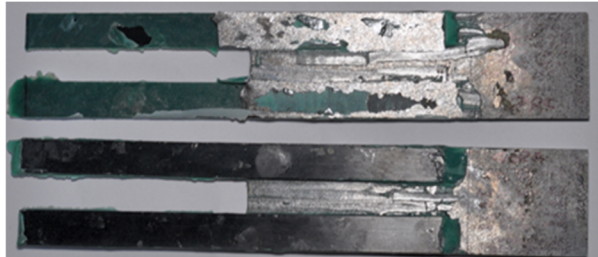
b) S355J2(P2)_SP220_SP150/2000+B (2);



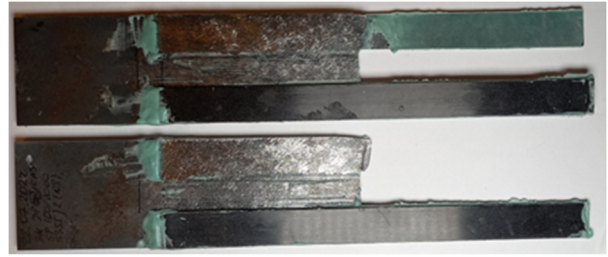
c) S355J2(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1);



d) S355J2(P2)_DP6310_SP150/2000+B (2);



e) S355J2(P2)_HY4080_SP150/2000+B (1);



f) S355J2(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3);

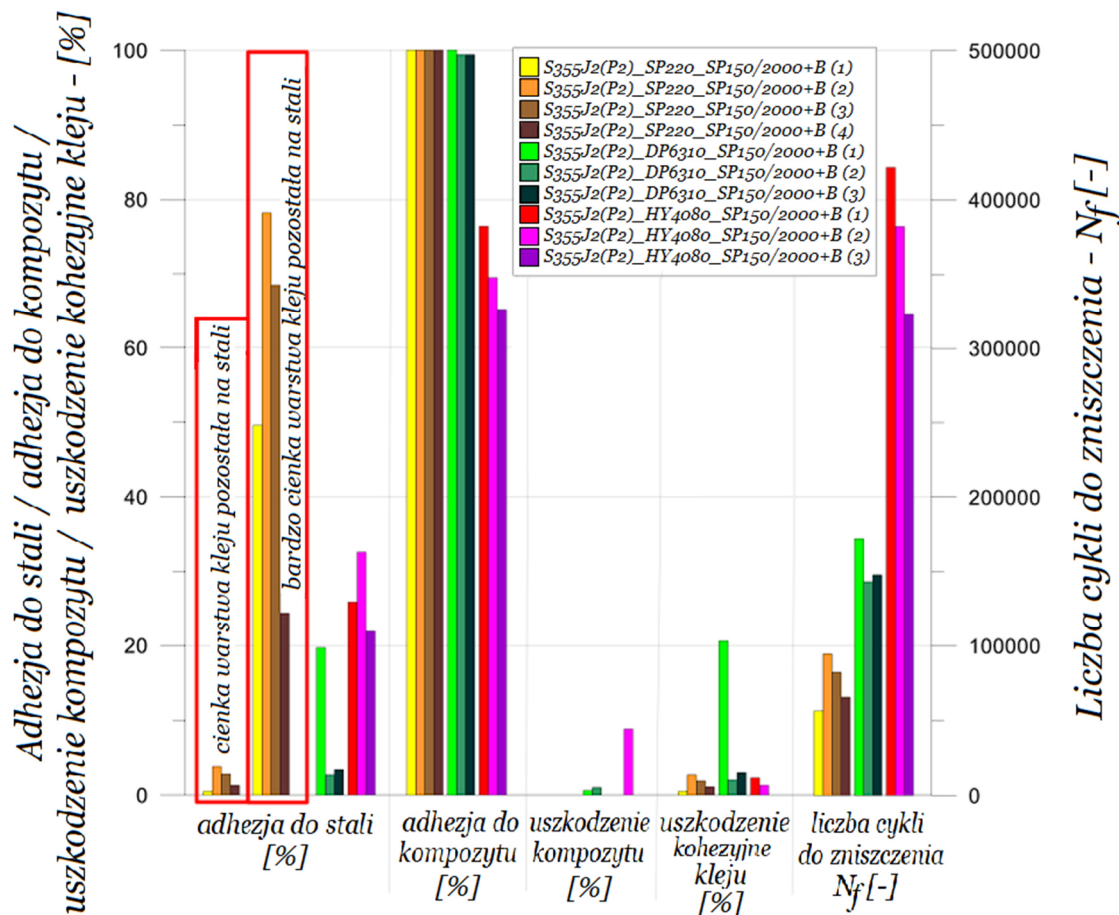
Rysunek 5.25. Wybrane formy zniszczenia próbek.

stalowego rdzenia nastąpiło na wskutek pęknięcia zmęczeniowego zainicjowanego w krawędziach spowodowanych obecnością otworu prostokątnego. W analizie MES wykazano, że największe naprężenia zastępcze występują w rdzeniu w punktach, gdzie promień zaokrąglenia przechodzi w pionową krawędź otworu prostokątnego. W trakcie badań zmęczeniowych we wspomnianych miejscach zaobserwowano inicjację pęknięć. Jest to również widoczne na załączonych zdjęciach przedstawiających zniszczone próbki na **rys. 5.25**.

Przed finalnym zniszczeniem próbek, obserwowano różne i złożone mechanizmy zniszczenia połączenia klejowego. Uwzględniając wszystkie przebadane próbki, najczęstszym było zniszczenie adhezyjne związane z utratą spójności ze stalowym rdzeniem. Inne formy uszkodzeń związane były ze zniszczeniem adhezyjnym na powierzchni kompozytu, uszkodzeniem kompozytu lub zniszczeniem kohezyjnym. Szczegółową ocenę poszczególnych form zniszczenia wykonano dla każdej próbki z osobna. Ocena uszkodzeń przeprowadzona została tylko na tych powierzchniach połączeń klejowych, które uległy całkowitemu zniszczeniu. W analizach uwzględniono określenie na jakim obszarze uszkodzonej powierzchni zaobserwowano:

- klej na stalowym rdzeniu (adhezja do stali);
- klej na kompozytowej nakładce (adhezja do kompozytu);
- uszkodzenie kompozytu;
- uszkodzenie kohezyjne kleju.

Wyniki zostały odniesione do powierzchni uszkodzenia adhezyjnego i wyrażone w procentach. Podsumowane wyniki zamieszczono na **rys 5.26**.



Rysunek 5.26. Procentowa ocena zjawisk zachodzących w połączeniach klejowych.

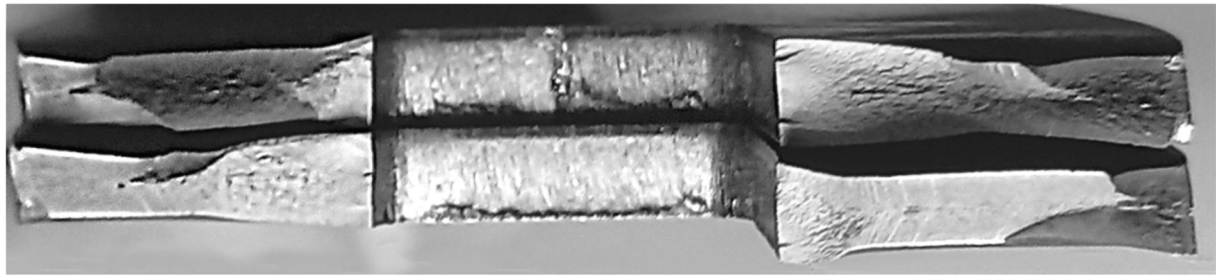
Największą adhezję do stalowego rdzenia uzyskano dla kleju HY4080GY (22-33%). W przypadku kleju S&P Resin 220 zostały zaobserwowane trzy formy zniszczenia adhezyjnego na powierzchni stali: 1 – gruba warstwa kleju pozostała na stali (0,5–4%); 2 – bardzo cienka warstwa kleju pozostała dla stali (24–78%); 3 – całkowity brak adhezji do stali (18–74%).

W przypadku kleju DP6310NS adhezja do stali na zniszczonych powierzchniach zawierała się w granicach 2,7–20%. Najśłabsza adhezja do kompozytu zmierzona została dla kleju HY4080GY (65–78%). Pozostałe dwa kleje (S&P Resin i DP6310NS) wykazały wysoką adhezję do powierzchni kompozytu (99–100%). Zniszczenie kompozytu zauważono tylko w trzech próbkach dotyczących spoiwa DP6310. Niewielkie zniszczenie kohezyjne (do 3%) wystąpiło prawie we wszystkich próbkach. Wyjątkiem była próbka S355J2(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1), w której zniszczenie kohezyjne osiągnęło prawie 21%. W tym przypadku było ono związane z wysoką adhezją kleju do powierzchni stali.

Wyraźne różnice zauważono w miejscu osłabienia próbek otworem prostokątnym w postaci tworzenia się szyjek. Największe szyjki zaobserwowano dla próbek bez nakładek wzmacniających. Podobne wyniki uzyskano dla próbek w których nakładki przyklejono za pomocą kleju S&P Resin 220. Nieznacznie mniejsze szyjki wytworzyły się w próbkach, w których połączenie wykonano z użyciem kleju DP6310NS. Natomiast, w odróżnieniu do pozostałych klejów, w przypadku zastosowania kleju HY4080GY, przynajmniej po jednej stronie otworu nie dochodziło do tworzenia się szyjki. Miało to kluczowe znaczenie na przebieg procesu zmęczenia, co w przypadku próbek z zastosowanym klejem HY4080GY wyraźnie skutkowało spowalnianiem procesu rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Efekt ten jest widoczny na **rys. 5.27.**, na którym porównano przełomy zmęczeniowe dla próbek z zastosowanymi różnymi klejami.

Porównując wykresy degradacji znormalizowanej sztywności dla wszystkich badanych próbek (**rys. 5.3.**, **rys. 5.5.**, **rys. 5.9.**, **rys. 5.13.**) można wyciągnąć następujące wnioski:

1. W przypadku próbek bez nakładek redukcja sztywności o ponad 2% obserwowana była po osiągnięciu 94–97% trwałości zmęczeniowej (**rys. 5.3.**). Związane jest to z procesem inicjacji i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego;
2. W przypadku zastosowania kleju S&P Resin 220 pierwsze uszkodzenia pojawiały się stosunkowo szybko ($0.5 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^4$ cykli – **rys. 5.5.**). Generalnie uszkodzenia te związane były z zerwaniem połączenia adhezyjnego na końcach nakładek;
3. W przypadku kleju DP6310NS pierwsze uszkodzenia w połączeniu adhezyjnym obserwowano między $4 \cdot 10^4$ – $6 \cdot 10^4$ cykli (**rys. 5.9.**). Podobnie jak w przypadku kleju S&P Resin 220 uszkodzenia te związane były z zerwaniem połączenia adhezyjnego na końcach nakładek;
4. W przypadku kleju HY4080GY spadki sztywności obserwowane były dopiero w końcowych fazach testów zmęczeniowych (powyżej $3 \cdot 10^5$ cykli - **rys. 5.13.**);
5. Największą stabilność połączenia klejowego w warunkach obciążeń zmęczeniowych zaobserwowano dla kleju HY4080GY, a najmniejszą stabilność wykazywał klej S&P Resin 220.



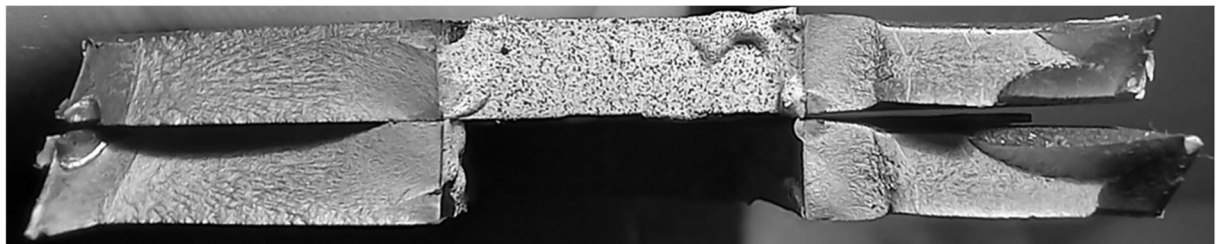
45 mm

a) *S355J2+N(P2)_bez wzmocnienia (1), $N_f=38\ 012$.*



45 mm

b) *S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (2) – $N_f=94\ 423$.*



45 mm

c) *S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1) – $N_f=172\ 184$.*

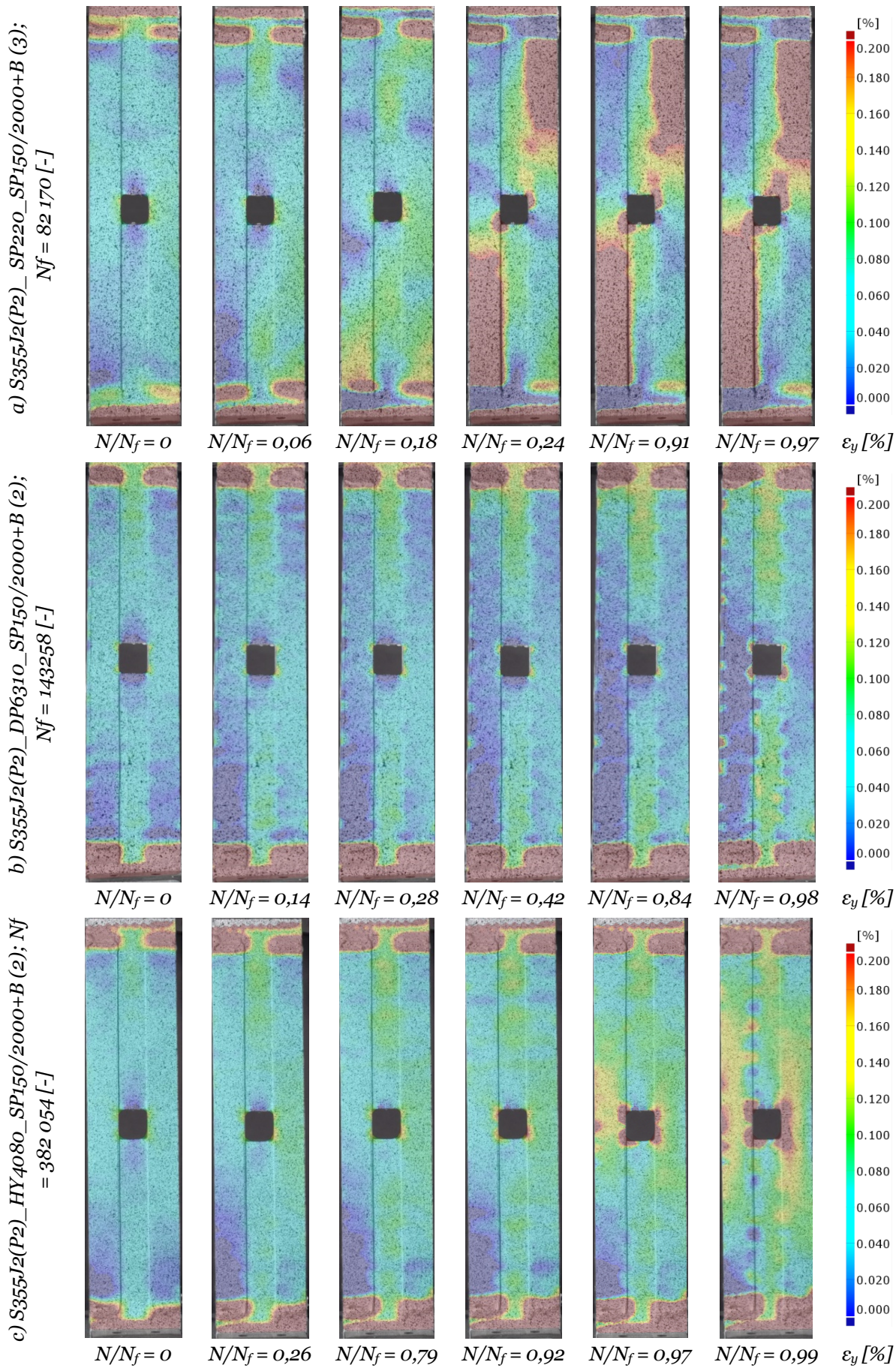


45 mm

d) *S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3) – $N_f=322\ 730$.*

Rysunek 5.27. Wybrane przelomy zmęczeniowe dla różnych typów spoiwa.

Powyższe wnioski znajdują również potwierdzenie w wynikach analiz przeprowadzonych za pomocą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). W przypadku kleju S&P Resin 220 dla próbki *S355J2(P2)_SP220_SP150_2000+B (3)* (**rys. 5.28.a**) można zaobserwować istotne zmiany w rozkładzie odkształceń rozciągających już po 5 000 cykli ($N/N_f=0,06$; gdzie N_f – jest to liczba cykli do zniszczenia). Kolejne cykle zmęczeniowe skutkują uszkodzeniem połączenia klejowego widocznego na rysunku dla ($N/N_f=0,18$). W konsekwencji prowadzi to do odklejenia się nakładek na znacznej



Rysunek 5.28. Wyniki analiz DIC dla wybranych próbek w danej fazie badania (N/N_f).

długości połączenia ($N/N_f=0,24$; uszkodzenie nakładek wystąpiło w lewym-dolnym i prawym górnym zakończeniu nakładek). Dokładny czas wystąpienia poszczególnych uszkodzeń można określić z wykresu przedstawiającego zmianę znormalizowanej sztywności próbki w funkcji liczby cykli (**rys. 5.5.**). Wyraźne spadki znormalizowanej sztywności związane są z degradacją połączenia klejowego zaobserwowanego w analizie DIC.

W przypadku kleju DP6310NS i próbki S355J2(P2)_DP6310_SP150/2000+B (2) (**rys. 5.28.b**) przyrost odkształceń rozciągających jest znacznie bardziej równomierny (podobnie jak spadek znormalizowanej sztywności na **rys. 5.9.**). W trakcie testu zmęczeniowego zaobserwowano odklejenie się nakładek po przeciwnej (niefotografowanej) stronie. Przyrastające uszkodzenie widoczne jest na kolejnych zamieszczonych zdjęciach.

W przypadku kleju HY4080GY próbka S355J2(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2) (**rys. 5.28.c**) uszkodzenie obserwowane jest pod koniec testu zmęczeniowego i związane jest z pękaniem rdzenia w okolicach karbów. Nie zaobserwowano uszkodzeń połączenia klejowego w trakcie badań aż do zniszczenia. Fakt ten potwierdza również charakter zmian znormalizowanej sztywności w czasie badania (**rys. 5.13.**).

Porównując rozkłady odkształceń dla poszczególnych klejów można wywnioskować, że dla badanej geometrii i przyjętych warunków obciążenia klej HY4080GY wykazuje najbardziej stabilne zachowanie a w szczególności zapewnia najbardziej efektywne odciążanie stref karbów w stalowym rdzeniu. Skutkuje to najwyższą trwałością zmęczeniową. Fakt ten potwierdza również obserwacja przelomów zmęczeniowych oraz analiza mechanizmu zniszczenia połączenia adhezyjnego w obszarze stref koncentracji naprężeń.

Porównując przelomy zmęczeniowe (**rys. 5.27**) największe strefy pękania zmęczeniowego wystąpiły dla kleju HY4080GY, mniejsze dla DP6310NS, a najmniejsze dla kleju S&P Resin 220. Ponadto, w przypadku kleju HY4080GY przynajmniej po jednej stronie przelomu zmęczeniowego nie powstawała szyjka. Ze zdjęć przedstawiających mechanizm zniszczenia połączenia klejowego (**rys. 5.25**) można zauważyć, że w otoczeniu karbów największą adhezję do stali wykazał klej HY4080GY. Mniejsza efektywność przylegania do stali zaobserwowana była dla kleju DP6310NS, natomiast nie zaobserwowano silnej adhezji kleju S&P Resin 220 do stali w otoczeniu karbów. Większa adhezja do stali w obszarze karbów przekłada się bezpośrednio na mechanizm odciążania stref karbów przez nakładki jak również na spowalnianie mechanizmu przyrostu pęknięć zmęczeniowych. W konsekwencji prowadziło to do uzyskania najwyższej trwałości zmęczeniowej dla kleju HY4080GY.

Podsumowując, zrealizowane badania wykazały, że zastosowanie kompozytowych nakładek wzmacniających umożliwia kilkukrotne zwiększenie trwałości zmęczeniowej próbek z silnymi koncentratorami naprężeń dla obciążenia maksymalnego skutkującego naprężeniem nominalnym bliskim granicy plastyczności w przekroju osłabionym (bez uwzględnienia efektu karbu) i charakteryzującym się wysoką rozpiętością pomiędzy wartościami ekstremalnymi ($R=0,1$).

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W rozdziale podsumowano przeprowadzone w rozprawie doktorskiej prace badawcze, sformułowano wnioski, a także wskazano dalsze kierunki prac badawczych.

6.1. Podsumowanie i dyskusja wyników

W prezentowanej pracy podjęto temat wzmacniania płaskich rozciąganych elementów konstrukcji z karbem. W szczególności skupiono się na badaniach zmęczeniowych.

W pierwszym kroku przebadano wytrzymałość złącza klejonego typu *DLJ*. Pozwoliło to na określenie obciążeń zapewniających daną trwałość zmęczeniową połączenia. W trakcie badań na zakończeniach połączenia zakładkowego dzięki analizie *MES* zaobserwowano koncentracje naprężeń odrywających (σ_{peel}) i naprężeń ścinających (τ). Mają one istotny wpływ na trwałość zmęczeniową złącza, co zostało to potwierdzone w testach eksperymentalnych. Brak odpowiedniego zakończenia spoiny klejowej powoduje duże odkształcenia na poprzecznych krawędziach nakładek w miejscu łączenia z rdzeniem. Wysoka wartość wspomnianych odkształceń stanowi jedną z pierwszych przyczyn uszkodzenia połączenia klejowego. Dlatego też zaleca się przygotowanie połączenia klejowego z uwzględnieniem wymogów zrównoważonej sztywności łączonych ze sobą elementów w celu osiągnięcia bardziej równomiernych rozkładów naprężeń. W zależności od badanych rodzajów próbek typu *DLJ* uzyskano odmienny charakter przebiegów znormalizowanego naprężenia ścinającego w kleju oraz przebiegów znormalizowanych naprężeń odrywających. Na podstawie przedstawionych w pracy analiz można wnioskować że niższa sztywność nakładek skutkuje wyższymi wartościami wspomnianych naprężeń. W efekcie końcowym obniża to trwałość statyczną i zmęczeniową próbek *DLJ* dla połączenia stal–kompozyt. Próbki o większej sztywności wykazały się wyższą trwałością. Zatem korzystniejszym przypadkiem wydaje się być „przesztywnienie” połączenia na korzyść nakładek. Dla zastosowanego w badaniach spoiwa S&P Resin 220 określono poziom maksymalnego naprężenia ścinającego przy którym możliwe było osiągnięcie miliona powtórzeń w badaniach zmęczeniowych. Dla połączenia stal–stal jest to 42% wartości statycznej wytrzymałości na ścinanie ($\tau_{max,FAT}=10,4\text{MPa}$). W przypadku połączenia stal–kompozyt trwałość zmęczeniowa została obniżona względem połączenia stal–stal i wyniosła około 24–30% wartości statycznej wytrzymałości na ścinanie ($\tau_{max,FAT}=6,01\text{–}7,51\text{MPa}$). Obniżenie trwałości wiąże się bezpośrednio ze sztywnością łączonych elementów, co przekłada się na rozkład naprężeń ścinających i odrywających. Powierzchnie połączenia *DLJ* po oderwaniu wykazują adhezyjną formę zniszczenia.

W drugim kroku badaniom poddano elementy konstrukcyjne z otworami. Pierwsza faza badań opierała się na wykorzystaniu jednego rodzaju spoiwa (S&P Resin 220), oraz różnych konfiguracji nakładek wzmacniających. Na podstawie

przeprowadzonych analiz wykazano wpływ nakładek na obniżenie wartości współczynnika kształtu (K_t). Istnieje kilka czynników decydujących o skuteczności wzmocnienia. Są to odpowiednio sztywność nakładek, kierunek ułożenia włókien względem zadanego obciążenia i powierzchnia oraz kształt nakładki. W przypadku krzywej rozciągania elementów znaczący jest wpływ kształtu wzmocnienia na zmianę charakteru krzywej. W przypadku próbki bez wzmocnienia, dla obciążenia F_{Ye} (odpowiada to naprężeniu nominalnemu w osłabionym przekroju bez uwzględnienia efektu spiętrzenia naprężeń równemu granicy plastyczności) krzywa rozciągania charakteryzuje się wyraźnym płynięciem materiału. Dla pozostałych przypadków przy naprężeniu równym granicy plastyczności (jak wyżej) efekt płynięcia zostaje zahamowany. Większa wartość kąta nachylenia krzywej rozciągania jest obserwowana przy wzmocnieniu prostokątnymi pasami. Użycie techniki *DIC* umożliwiło analizę rozkładu odkształcenia w badanych elementach. Charakterystycznymi miejscami, w których pojawiają się wysokie wartości odkształceń, są zaokrąglenia otworu (karby) i zakończenia spoiny klejowej. W badaniach zmęczeniowych elementów z nakładką kwadratową (+A) w których zastosowano różne poziomy obciążenia można zaobserwować znaczący przyrost trwałości ($\delta_{inc}^i=203-447\%$) dla obciążeń takich, jak: $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}\leq 0,92$ (w rdzeniu). W przypadku zastosowania spoiwa kruchego jakim jest spoiwo S&P Resin 220, efekt uplastycznienia w karbie i jego otoczeniu powoduje jego wykruszanie wskutek niewielkich możliwości odkształcania się kleju. Omówiony mechanizm jest możliwy do zaobserwowania szczególnie dla nakładek o kształcie kwadratu (+A) dla trzech różnych kompozytów włóknistych. W przypadku obciążenia na poziomie $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=1,01$ wzrost trwałości zmęczeniowej zawiera się w zakresie $\delta_{inc}^i=80-103\%$ dla wzmocnienia typu (+A). Zamiana formy wzmocnienia na długie prostokątne pasy (+B) pozwala na uzyskanie przyrostu trwałości na poziomie $\delta_{inc}^i=610\%$ (przy tym samym obciążeniu). Uzyskany wzrost trwałości jest związany z większą powierzchnią połączenia klejowego, jak również z wyższą sztywnością wzmocnienia.

W drugiej serii badań zbadano wpływ spoiwa na trwałość zmęczeniową. Ustalony poziom obciążenia odpowiadał poziomowi naprężeń $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=0,93$ (w rdzeniu). Przebadano elementy bez i ze wzmocnieniem w formie pasów prostokątnych (+B) i zastosowano trzy różne rodzaje klejów na bazie epoksydowej (SP220), poliuretanowej (DP6310) oraz cyjano-akrylowej (HY4080). Najwyższy przyrost trwałości uzyskano dla spoiwa Loctite HY4080 wynoszący średnio $\bar{\delta}_{inc}^i=890\%$. Najniższym rezultatem charakteryzuje się spoiwo S&P Resin 220, w którym średni przyrost trwałości wynosi $\bar{\delta}_{inc}^i=97\%$. Na podstawie przedstawionego zestawienia przełomów w rozdziale 5, można zauważyć, że wraz z uzyskaniem wyższej trwałości wzrasta udział powierzchni zmęczeniowej. W przypadku najwyższej uzyskanej w badaniach trwałości ($\bar{\delta}_{inc}^i=890\%$) prawie cała powierzchnia jednej z części osłabionego otworem przekroju stanowi przełom zmęczeniowy. Można zatem wnioskować, że poprzez zastosowanie odpowiedniego spoiwa nakładki mają zdolność do przejmowania i przenoszenia znaczącej części obciążenia zewnętrznego.

W dalszych rozważaniach przedstawiono zmianę sztywności elementów w trakcie zadawanych obciążeń. Parametr ten dokładnie umożliwia identyfikację spadków

szttywności elementu – co umożliwia wskazanie przedziału dla którego następuje degradacja elementu lub odrywanie nakładek. Najbardziej stabilne przebiegi sztywności zachowują w tym wypadku wzmocnione elementy, w których użyto spoiwa Loctite HY4080GY. W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że zastosowanie kleju z niższym modułem Younga (E) oraz większą dopuszczalną wartością odkształcenia maksymalnego (ϵ_u) niweluje efekt odrywania nakładek i zapewnia wyższą trwałość zmęczeniową. Kolejną częścią badań było zmierzenie grubości warstw kleju i wskazanie typowych mechanizmów zniszczenia spoiwa. Klej SP220 posiadał kruchy charakter pęknięcia. Spoiwo DP6310NS charakteryzowało się pęknięciami i oderwaniami kleju. Klej HY4080 charakteryzował się najlepszym przyleganiem do podłoża, a pojawiające się na powierzchni kleju defekty w postaci pęknięć miały miejsce głównie w okolicach karbu. Dla przeprowadzonych testów z różnymi spoiwami wykonano analizę *DIC* i *MES* dla obciążenia wynoszącego $F_{max}=47.5\text{kN}$. Zestawienie wyników daje satysfakcjonujące porównanie i zbliżone do siebie wyniki. W końcowej części pracy za pomocą *DIC* porównano zmianę odkształceń przy różnych wartościach zrealizowanych cykli do zniszczenia (N/N_f). Zestawienie warstw z analizy *DIC* umożliwia zaobserwowanie przyrostu odkształceń, które informują o degradacji badanych elementów w trakcie badań zmęczeniowych.

6.2. Wnioski

Zaprezentowane w pracy wyniki dowodzą efektywności i celowości zastosowania nakładek wzmacniających które bezpośrednio przekładają się na wzrost trwałości zmęczeniowej elementów. Zakładany cel pracy został zrealizowany, co więcej uzyskany wzrost trwałości zmęczeniowej nawet przekracza rezultaty opublikowane w pracach [15,52,68].

Na podstawie przedstawionych w pracy badań eksperymentalnych, jak również analiz numerycznych można sformułować następujące wnioski:

– Zastosowanie nakładek w postaci długich pasów wzmacniających (+B) naklejonych po bokach otworu pozwala na skuteczne wzmocnienie i średni wzrost trwałości o $\bar{\delta}_{inc}^i=890\%$ przy zastosowaniu spoiwa Loctite HY4080.

– Znaczącym czynnikiem decydującym o skuteczności wzmocnienia jest zastosowanie odpowiedniego spoiwa. W rozważanym w pracy przypadku najkorzystniejsze okazały się spoiwa elastyczne. Dla HY4080 średni przyrost trwałości określony został na $\bar{\delta}_{inc}^i=890\%$, a dla kleju DP6310 średni wzrost trwałości wyniósł $\bar{\delta}_{inc}^i=307\%$. Natomiast spoiwo SP220 wykazywało stosunkowo dużą kruchość i niską wartością odkształcenia do momentu utraty spójności. Średni przyrost jego trwałości wyniósł $\bar{\delta}_{inc}^i=97\%$.

– W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że zastosowanie kleju z niższym modułem Younga (E) oraz większą dopuszczalną wartością odkształcenia maksymalnego (ϵ_u) niweluje efekt odrywania nakładek i zapewnia najwyższą trwałość zmęczeniową.

– Badania przeprowadzone z wykorzystaniem spoiwa SP220 dla kwadratowych nakładek (+A) wykazały, że znaczący wzrost trwałości można otrzymać przy współczynniku obciążenia odpowiadającym $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH} \leq 0,92$ (pierwsza partia materiału).

– Przy współczynniku obciążenia odpowiadającym $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH} = 1,01$ (materiał jak wyżej) dla zastosowanych nakładek kwadratowych (+A) wykonanych z różnych materiałów kompozytowych nie wykazano znaczącej różnicy w wynikach – wzrost trwałości wniósł $\delta_{inc}^i = 80-103\%$. Dla nakładek w formie prostokątnych pasów (+B) z trzykrotnie większą powierzchnią sklejenia osiągnięto rezultat $\delta_{inc}^i = 610\%$.

– Wraz ze wzrostem trwałości badanych elementów następuje zmiana struktury przełomów – im wyższa trwałość tym większa powierzchnia przełomu zmęczeniowego. Oznacza to, że w zależności od spoiwa wzrasta zdolność do przenoszenia obciążeń przez zastosowane wzmocnienie wykonane z kompozytów włóknistych.

– Zastosowanie wzmocnienia spowodowało zmniejszenie stref odkształceń plastycznych w rdzeniu z otworem. Skuteczniejsze okazało się wzmocnienie typu (+B) – Obniżenie współczynnika kształtu (K_t) poprzez zastosowanie nakładki zależy od kąta ułożenia włókien kompozytu w kierunku obciążenia, oraz od powierzchni nakładek wzmacniających.

Podsumowując, cel pracy został osiągnięty. Realizacja odbyła się poprzez wykonanie testów eksperymentalnych, oraz wykorzystanie narzędzi w postaci techniki cyfrowej korelacji obrazu (*DIC*), oraz metody elementów skończonych (*MES*). W pracy potwierdzono możliwość znacznego wzrostu trwałości zmęczeniowej poprzez zastosowanie odpowiedniego kształtu i rodzaju wzmocnienia. Istotą skuteczności wzmocnienia i wzrostu trwałości zmęczeniowej względem elementów bez wzmocnienia jest odpowiedni dobór spoiwa, które ma decydujący wpływ na wyniki końcowe.

6.3. Kierunki i perspektywy dalszych prac

Przeprowadzone badania i zaprezentowane w pracy wyniki analiz i badań doświadczalnych pozwoliły na uzyskanie wielu interesujących wyników. Jednakże zakres pracy stanowi jedynie drobną część zagadnień wzmacniania elementów konstrukcji z karbami. W trakcie prowadzenia prac badawczych napotkano szereg problemów technicznych, których szczegółowa analiza i rozwiązanie może wytyczyć kierunki dalszych prac badawczych. Odpowiednio do najważniejszych z nich można zaliczyć:

1. Badania innych rodzajów spoiwa (np.: na bazie akrylowej) o różnych własnościach mechanicznych i przebadanie ich wpływu na trwałość wzmocnionych elementów konstrukcji;
2. Zbadanie wpływu innych konfiguracji ułożenia włókien jednokierunkowych materiałów kompozytowych w nakładkach wzmacniających np.: $[0^\circ/30^\circ]$,

- [0°/60°], [0°/30°/60°/30°/0°], które niwelują efekt pęknięcia osnowy wzdłuż włókien w miejscach koncentracji naprężeń;
3. Wykonanie szczegółowych badań uwzględniających wpływ grubości warstwy danego typu spoiwa na trwałość zmęczeniową i znalezienie optymalnych zakresów stosowania;
 4. Optymalizacja długości nakładek wzmacniających w formie pasów (+B) w celu uzyskania najwyższych trwałości;
 5. Określenie wpływu różnych kształtów zakończenia spoiny klejowej, oraz kształtu zakończenia elementu klejonego na rozkłady naprężeń odrywających σ_{peel} oraz tnących τ i ich wpływu na wytrzymałość statyczną i zmęczeniową;
 6. Przeprowadzenie badań dla innych warunków obciążenia uwzględniających inną asymetrię cyklu (R), a także dla wieloosiowego stanu obciążenia elementu;
 7. Przeprowadzenie badań wpływu wzmocnienia dla elementów z wieloma karami, w szczególności z układem karbów odciążających w osłabionym elemencie;
 8. Zaprojektowanie specjalnych szablonów, które umożliwią precyzyjne powtarzalne przygotowanie elementów klejonych – typu *DLJ* i aplikacji wzmocnień o zadanym kształcie. Szablony powinny zapewnić uzyskanie powtarzalnej grubości spoiny (t_{adh}) i kształtu jej zakończenia.
 9. Wykonanie badań z uwzględnieniem jednostronnego wzmocnienia i jego wpływu na trwałość zmęczeniową w kontekście porównania wykonanych badań dla dwustronnego wzmocnienia;
 10. Zastosowanie innych badań takich jak: badania defektoskopowe, tensometria elektrooporowa, termografia lub radiologia (metoda rentgenowska lub tomografia) do monitorowania stanu uszkodzenia elementu ze wzmocnieniem w celu szczegółowej analizy skutków degradacji materiałów na każdym z etapów badania;
 11. Wykonanie badań trwałości połączeń klejowych przygotowanych w hybrydowej technologii wykonania polegającej na miejscowym zastosowaniu klejów według ich odporności na zjawiska zachodzące w obciążonym zmęczeniowo w złączu klejonym, tj. zastosowanie kleju odpornego na działanie naprężeń odrywających (HY4080) w miejscach zakończenia wzmocnienia i uformowania ukosowania, kleju o wysokiej wytrzymałości (SP220) w miejscach niewielkich odkształceń na długości wzmocnienia, oraz kleju o dobrej elastyczności (DP6310) w miejscu karbu, gdzie pojawiają się duże odkształcenia spowodowane spiętrzeniem naprężeń;
 12. Określenie wpływu warunków środowiskowych takich jak gazy lub ciecze, promieniowanie UV, jak również przeprowadzenie badań złączy w temperaturach podwyższonych i obniżonych.

Wskazane obszary badawcze sprawiają, że problem wzmacniania elementów konstrukcji z karami za pomocą nakładek kompozytowych jest tematem perspektywnym, a uzyskane wyniki badań pozwolą na określenie precyzyjnych wytycznych do projektowania wzmocnień z kompozytów włóknistych.

Literatura

- [1] SZYBIŃSKI B. *Zagadnienia koncentracji naprężeń w płytach i powłokach – modelowanie i optymalizacja*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011.
- [2] PILKEY W. D., PILKEY D. F. *Peterson's Stress Concentration Factors*. John Wiley & Sons Inc., USA, 2008
- [3] SINES G., WAISMAN J. L. et al. *Metal fatigue*. McGraw-Hill Book Company Inc., New York-Toronto-London, 1959.
- [4] KOCAŃDA S. *Zmęczeniowe niszczenie metali*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.
- [5] KOCAŃDA S., KOCAŃDA A. *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1989.
- [6] ASHBY M., SHERCLIFF H., CEBON D. *Inżynieria Materiałowa – TOM 1*. Wydawnictwo Galaktyka, Łódź, 2011.
- [7] YANG Z., KIM, C. B., CHO C., BEOM H. *The concentration of stress and strain in finite thickness elastic plate containing a circular hole*. International Journal of Solids Structures, 2008, vol. 45, pp. 713-731.
- [8] KIRSCH A. *Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre*. Springer 1989, vol 42, pp. 797.
- [9] INGLIS C. E. *Stress in a plane due to the presence of cracks and sharp corners*. Trans Inst. Naval Arch, London, vol. 60, 1913.
- [10] KOLOSOV G. V. *Primeneniye kompleksnykh diagramm i teorii funktsiy kompleksnoy peremennoy k teorii uprugosti (org.: Применение комплексных диаграмм и теории функций комплексной переменной к теории упругости)*. GTGI, Moskva, 1935.
- [11] MUSCHELISVILI N. I. *Nektorye osmotnye zadani matematicheskoy teorii uprugosti (org.: Некоторые основные задачи математической теории упругости)*. Izd. A. N. SSSR 1935, II wyd. 1949.
- [12] NEUBER, H. *Kerbspannungslehre: Grund lagen für genaue Festigkeitsberechnung mit Berücksichtigung von Konstruktions for mund Werkstoff*. Springer-Verlag, Berlin, 1958 (I wyd. 1937).
- [13] SAVIN G.N. *Stress Distribution Around Holes*. Naukova Dumka Press, Kiev 1968.
- [14] LEKHNITSKIY S.G. *Anizotropnye Plastinki (org.: Анизотропные Пластинки)*. Gosudarstvennoye Izdatel'stvo Tekhniko-Teoreticheskoy Literatury, Moskva, 1957
- [15] FROCHT M. M. *Photoelasticity*, Tom I, Tom II. John Wiley, New York, 1948, 1957
- [16] PETERSON R. E. *Stress Concentration Design Factors*. Wiley, New York, 1953
- [17] SIHA G. C. *Handbook of stress intensity factors*. Inst. of Fracture and Solid Mechanics, Leigh University, 1973.
- [18] SAVIN G.N., TULCYJ V.I. *Spravochnik po koncentracii napryazhenij (org.: Справочник по концентрации напряжений)*, Kiev, Wysca Skola, 1976.
- [19] BUCHHOLZ, K. *Digital Image Correlation Strain Analysis of Geometric Stress Concentrations*. National MAGLAB conference – Poster Session, 2016
- [20] KOWALEWSKI Z. L. *Zmęczenie materiałów – podstawy, kierunki badań, ocena stanu uszkodzenia*. Siedemnaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 2011.
- [21] HELLER M., BURCHILL M., WESCOTT R., WALDMAN W., KAYE R., EVANS R., MCDONALD M. *Airframe Life Extension by Optimised Shape Reworking Overview of DSTO Developments*. 25th ICAF Symposium – Rotterdam, 2009, pp. 279 – 299.
- [22] BEER F. P., JOHNSTONE JR. E. R., DEWOLF J. T., MAZUREK D. F. *Statics and mechanics of materials*, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 2011.
- [23] SAMBORSKI M., SŁOWIK M. *Klasyfikacja elementów konstrukcyjnych w świetle teorii wytrzymałości materiałów oraz literatury inżynierskiej*, Budownictwo i Architektura, vol 16, no. 3, 2017.
- [24] JANKOWSKI Z., CHUDYBA K. *Kształtowanie płyt, belek i słupów, [w]: Konstrukcje betonowe, żelbetonowe i sprężone*. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2005, pp. 245-282, ISBN: 83-7413-651-0.
- [25] TIMOSHENKO S., WOINOWSKY-KRIEGER S. *Teoria płyt i powłok*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1962.
- [26] YOUNG W. C., BUDYNAS R. G. *Roark's Formulas for Stress and Strain – 7th edition*. McGraw-Hill Book Company Inc., USA, 2002.
- [27] TAN S.C. *Finite-width Correction Factors for Anisotropic Plate Containing a Central Opening*. Journal of Composite Materials, 1988, vol. 22, iss. 11, pp. 1080-1097.

- [28] KHECHAI A., TATI A., GUERIRA B., GUETTALA A., MOHITE P.M. *Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using digital image correlation*. *Composite Structures*, 2018, vol. 185, pp. 699–715.
- [29] BAKHSHANDEH K., RAJABI I., RAHIMI F. *Investigation of Stress Concentration Factor for Finite-Width Orthotropic Rectangular Plates with a Circular Opening Using Three-Dimensional Finite Element Method*. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, vol. 54, iss. 2, pp. 140–147.
- [30] GERE J. M. *Mechanics of Materials*. Thomson Learning, USA, 2004.
- [31] NIEZGODZIŃSKI M. E., NIEZGODZIŃSKI T. *Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2017.
- [32] KARBHARI V., SHULLEY S. *Use of composites for rehabilitation of steel structures—Determination of bond durability*. *J. Mater. Civ. Eng.* 1995, 7, pp. 239–245.
- [33] MASOUD, S., SOUDKI, K.; TOPPER, T. *CFRP-strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads*. *J. Compos. Constr.* 2001, 5, pp. 228–236.
- [34] ZHAO X.-L.; ZHANG L. *State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures*. *Eng. Struct.* 2007, vol. 29, pp. 1808–1823.
- [35] SCHNERCH D., DAWOOD M., RIZKALLA S., SUMNER E. *Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials*. *Constr. Build. Mater.* 2007, 21, pp. 1001–1010.
- [36] MOTALEB M., LINDQUIST W., IBRAHIM A., HINDI R. *Repair assessment for distortion-induced fatigue cracks in a seismically retrofitted double-deck bridge complex*. *Eng. Struct.* 2019, 183, pp. 124–134.
- [37] ZIELIŃSKI A. P., SANECKI H., WACHOWICZ Ł. *Analiza konstrukcji walcowych zbiorników ciśnieniowych w strefach otworów*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2012.
- [38] DUDEK A., ŁACZEK S. *Zbiornik ciśnieniowy spawany – materiały pomocnicze do projektu z podstaw konstrukcji maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006.
- [39] HOLLAWAY L., CADEI J. *Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites*. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2002, 4, pp. 131–148.
- [40] SCHNERCH D., STANFORD K., LANIER B., RIZKALLA S. *Use of high modulus carbon fiber reinforced polymers (CFRP) for strengthening steel structures*. In: *Proceedings of the Second International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications*, Cairo, Egypt, 16–18 December 2003.
- [41] FISHER J.W. *Evolution of fatigue-resistant steel bridges*. *Transp. Res. Rec.* 1997, 1594, pp. 5–17.
- [42] HOLLAWAY L. *Laminate theory: Macroanalyses of composite laminates*. In: *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*. Springer Science+Business Media: Dordrecht, The Netherlands, 1993; pp. 63–95
- [43] MILLER T.C., CHAJES M.J., MERTZ D.R., HASTINGS J.N. *Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates*. *J. Bridge Eng.* 2001, 6, pp. 514–522.
- [44] ŁAGODA M., KOWAL M. *CFRP composite material strengthening of flat steel elements to reduce the stresses in the steel*. *Structure and Environment*, 2014, no. 4, vol. 6, pp. 5–11.
- [45] COLOMBO C., VERGANI L., BURMAN M. *Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites*. *Compos. Struct.* 2012, 94, pp. 1165–1174.
- [46] SEN R. *Advances in the application of FRP for repairing corrosion damage*. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2003, 5, pp. 99–113.
- [47] ORCESIA A.D, FERAILLE A., CHATAIGNER S. *Fatigue strengthening of steel structures using high modulus CFRP plates: Development of a life-cycle analysis approach*. *Construction and Building Materials*, 2019, 227
- [48] TENG J., YU T., FERNANDO D. *Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites*. *J. Constr. Steel Res.* 2012, 78, pp. 131–143.
- [49] DENG J., JIA Y., ZHENG H. *Theoretical and experimental study on notched steel beams strengthened with CFRP plate*. *Compos. Struct.* 2016, 136, pp. 450–459.
- [50] HU L.L., ZHAO X.L., FENG P. *Fatigue Behavior of Cracked High-Strength Steel Plates Strengthened by CFRP Sheets*. *J. Compos. Constr.* 2016, 20, 04016043.
- [51] WANG Z.Y., WANG Q.Y., LI L., ZHANG N. *Fatigue behavior of CFRP strengthened open-hole steel plates*. *Thin-Walled Struct.* 2017, 115, pp. 176–187.
- [52] WANG Z.Y., ZHANG T., LI X., WANG Q.Y., HUANG W., SHEN M. *Characterization of the effect of CFRP reinforcement on the fatigue strength of aluminum alloy plates with fastener holes*. *Eng. Struct.* 2018, 177, pp. 739–752.
- [53] WANG Y., ZHENG Y., LI J., ZHANG L., DENG J. *Experimental study on tensile behavior of steel plates with Centre hole strengthened by CFRP plater under Marine environment*. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2018, 84, pp. 18–26.

- [54] ALJABAR N.J., ZHAO X.L., AL-MAHAIDI R., GHAFOORI E., MOTAVALLI M., KOAY Y.C. *Experimental investigation on the CFRP strengthening efficiency of steel plater with inclined cracks under fatigue loading*. Eng. Struct. 2018, 172, pp. 877–890.
- [55] YE H., SHUAI, C., ZHANG X., XU X., UMMENHOFER T. *Determination of S-N fatigue curves for damaged steel plates strengthened with prestressed CFRP plates under tension loading*. Eng. Struct. 2018, 175, pp. 669–677.
- [56] ROMANOWICZ P.J., SZYBIŃSKI B., WYGODA M. *Preliminary Experimental and Numerical Study of Metal Element with Notches Reinforced by Composite Materials*. J. Compos. Sci. 2021, 5, 134. <https://doi.org/10.3390/jcs5050134>.
- [57] ÇALIK A. *Effect of Adherend Shape on Stress Concentration Reduction of Adhesively Bonded Single Lap Joint*. Engineering Review, 2016, vol. 36, pp. 29–34.
- [58] MUC A., CHWAŁ M., ROMANOWICZ P., STAWIARSKI A. *Fatigue-Damage Evolution of Notched Composite Multilayered Structures under Tensile Loads*. J. Compos. Sci. 2018, pp. 2, 27.
- [59] ROMANOWICZ P., MUC A. *Estimation of Notched Composite Plates Fatigue Life Using Residual Strength Model Calibrated by Step-Wise Tests*. Materials 2018, 11, 2180.
- [60] BRAUN M., FISCHER C., BAUMGARTNER J., HECHT M., VARFOLOMEEV I. *Fatigue Crack Initiation and Propagation Relation of Notched Specimens with Welded Joint Characteristics*. Metals 2022, 12, 615. <https://doi.org/10.3390/met12040615>.
- [61] MUC A., BARSKI M., CHWAŁ M., ROMANOWICZ P., STAWIARSKI A. *Fatigue damage growth monitoring for composite structures with holes*. Compos. Struct. 2018, 189, pp. 117–126.
- [62] ROMANOWICZ P.J., SZYBIŃSKI, B., WYGODA M. *Application of DIC Method in the Analysis of Stress Concentration and Plastic Zone Development Problems*. Materials 2020, 13, 3460.
- [63] SZYBIŃSKI B., ROMANOWICZ P., ZIELIŃSKI A.P. *Numerical and experimental analysis of stress and strains in flat ends of high pressure vessels*. Key Engineering Materials, 2011, 490, pp. 226–236.
- [64] TAVAKKOLIZADEH M., SAADATMANESH H. *Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch*. J. Struct. Eng. 2003, 129, pp. 186–196.
- [65] HU L., FENG P., ZHAO X.L. *Fatigue design of CFRP strengthened steel members*. Thin-Walled Struct. 2017, 119, pp. 482–498.
- [66] JONES S.C., CIVJAN, P.E. *Application of Fiber Reinforced Polymer Overlays to Extend Steel Fatigue Life*. Journal Of Composites For Construction 2003, vol. 7, pp. 331–338.
- [67] LIU H., AL-MAHAIDI R., ZHAO X.L. *Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures*. Composite Structures, 2009, vol. 90, pp. 12–20.
- [68] TÄLJSTEN B., HANSEN C.S., SCHMIDT J.W. *Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates*. Construction and Building Materials, 2009, vol. 23, pp. 1665–1677.
- [69] HUAWEN Y., KÖNIG C., UMMENHOFER T., SHIZHONG Q., PLUM R. *Fatigue Performance of Tension Steel Plates Strengthened with Prestressed CFRP Laminates*. Journal Of Composites For Construction, 2010, vol. 14, pp. 609–615.
- [70] YU Q.Q., CHEN T., GU X.L., ZHAO X.L., XIAO Z.G. *Fatigue behaviour of CFRP strengthened steel plates with different degrees of damage*. Thin-Walled Structures, 2013, vol. 69, pp. 10–17.
- [71] LEPRETRE E., CHATAIGNER S., DIENG L., GAILLET L. *Fatigue Strengthening Of Cracked Steel Plates With Cfrp Laminates In The Case Of Old Steel Material*. Construction and Building materials, Elsevier, 2018, vol. 174, pp. 421–432.
- [72] CHEN T., YAO J., LIU R., LI L. *Fatigue behavior of steel plates with multi-holes repaired by CFRP*. Composite Structures, 2020, vol. 242, 112163.
- [73] DOROUDI Y., FERNANDO D., HOSSEINI A., GHAFOORI E. *Behavior of cracked steel plates strengthened with adhesively bonded CFRP laminates under fatigue Loading: Experimental and analytical study*. Composite Structures, 2021, vol. 266, 113816.
- [74] LEPRETRE E., CHATAIGNER S., DIENG L., GAILLET L. *Stress Intensity Factor Assessment for the Reinforcement of Cracked Steel Plates Using Prestressed or Non-Prestressed Adhesively Bonded CFRP*. Materials, 2021, vol. 14, 1625, <https://doi.org/10.3390/ma14071625>.
- [75] JEANDRAU J.P., PEYRAC C., LEFEBVRE F. *Fatigue behaviour of adhesive joints*. Procedia Eng. 2015, 133, pp. 508–517.
- [76] CHATAIGNER S., WAHBEH M., GARCIA-SANCHEZ D., BENZARTI K., BIRTEL V., FISCHER M., SOPEÑA L., BOUNDOKI R., LEHMANN F., MARTÍN, E., et al. *Fatigue Strengthening of Steel Bridges with Adhesively Bonded CFRP Laminates: Case Study*. J. Compos. Constr. 2020, 24, 05020002.
- [77] WANG L., ZHANG Y., LIU Y. *Experimental investigation on flexural behaviors of cyclic overloading PRC beams strengthened with prestressed CFRP fabric*. Structures 2021, 33, pp. 2713–2723.

- [78] TAFSIROJJAMAN T., FAWZIA S., THAMBIRATNAM D.P. *Structural behaviour of CFRP strengthened beam-column connections under monotonic and cyclic loading*. Structures 2021, 33, pp. 2689–2699.
- [79] ZHAO X.L., ZHANG L. *State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures*. Engineering Structures, 2007, vol. 29, pp. 1808–1823.
- [80] TAFSIROJJAMAN T., DOGAR A.U.R., LIU Y., MANALO A., THAMBIRATNAM D. P. *Performance and design of steel structures reinforced with FRP composites: A state-of-the-art review*. Engineering Failure Analysis, 2022, vol. 138, 106371.
- [81] LESANI M., BAHAAARI M.R., SHOKRIEH M.M. *Experimental investigation of FRP-strengthened tubular T-joints under axial compressive loads*. Construction and Building Materials, 2014, vol. 53, pp. 243–252.
- [82] KABIR M.H., FAWZIA S., CHAN T.H.T., BADAWI M. *Durability of CFRP strengthened steel circular hollow section member exposed to sea water*. Construction and Building Materials, 2016, vol. 118, pp. 216–225.
- [83] European Cooperation for Space Standardization. *A Space Engineering Adhesive Bonding Handbook*; ECSS-E-HB-32-21, ESA Requirements and Standards Division; ECSS, Noordwijk, The Netherlands, 2011.
- [84] DA SILVA L.F.M., OCHSNER A., ADAMS R.D. *Design Rules and Methods to Improve Joint Strength*. In Handbook of Adhesion Technology; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 690–720.
- [85] HULIMKA J., KAŁUŻA M. *Preliminary tests of steel-to-steel adhesive joints*. Procedia Eng. 2017, 172, pp. 385–392.
- [86] TSAI M.Y., MORTON J. *An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherends*. Int. J. Solids Struct. 2010, 47, pp. 3317–3325.
- [87] DIHARJO K., ANWAR, M., TARIGAN R.A.P., RIVAI, A. *Effect of Adhesive Thickness and Surface Treatment on Shear Strength on Single Lap Joint Al/CFRP using Adhesive of Epoxy/Al Fine Powder*. 6th Nanoscience and Nanotechnology Symposium (NNS2015); AIP Publishing LLC, Melville, NY, USA, 2016.
- [88] WEI K.; CHEN, Y., LI M., YANG X. *Strength and Failure Mechanism of Composite-Steel Adhesive Bond Single Lap Joints*. Adv. Mater. Sci. Eng. 2018, vol. 1, 5810180.
- [89] QUINI J.G., MARINUCCI G. *Polyurethane Structural Adhesives Applied in Automotive Composite Joints*. Mater. Res. 2012, col.15, pp. 434–439.
- [90] DAVIS M.J., MCGREGOR A. *Assesing Adhesive Bond Failures: Mixed-Mode Bond Failures Explained*. Adhes. Assoc. 2010, pp. 1–12.
- [91] DAVIS M.J., BOND D.A. *The Importance of Failure Mode Identification In Adhesive Bonded Aircraft Structures and Repairs*. In Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials, Paris, France, 5–9 July 1999.
- [92] NASR SALEH M.. SAEEDIFAR M.. ZAROUCAS D., DE FREITAS S.F. *Stress analysis of double-lap bi-material joints bonded with thick adhesive*. Int. J. Adhes. Adhes. 2020, vol. 97, 102480.
- [93] BOCCIARELLI M.. COLOMBI, P.. FAVA, G.. POGGI, C. *Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates*. Compos. Struct. 2009, vol. 87, pp. 334–343.
- [94] VOLKERSEN O. *Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen Mit Konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938, vol. 15, pp. 41–47.
- [95] GOLAND M., REISSNER E. *The Stresses In Cemented Joints*. J. Appl. Mech. 1944, vol. 11, pp. 4–47.
- [96] DA SILVA L.F.M.; DAS NEVES P.J.C.; ADAMS R.D.; SPELT J.K. *Analytical Models of Adhesively Bonded Joints—Part I: Literature Survey*. Int. J. Adhes. Adhes. 2009, vol. 29, pp. 319–330.
- [97] TONG L., LUO Q., *Analytical Approach*. In Handbook of Adhesion Technology; da Silva, L.F.M., Öchsner, A., Adams, R.D., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 665–700.
- [98] ZHAO B., LU Z.H., LU Y.N., *Closed-Form Solutions for Elastic Stress-Strain Analysis In Unbalanced Adhesive Single-Lap Joints Considering Adherent Deformations and Bond Thickness*. Int. J. Adhes. Adhes. 2011, vol. 31, pp. 434–445.
- [99] DA SILVA L.F.M.; DAS NEVES, P.J.C.; ADAMS, R.D.; WANG, A.; SPELT, J.K. *Analytical Models of Adhesively Bonded Joints—Part II: Comparative Study*. Int. J. Adhes. Adhes. 2009, vol. 29, pp. 331–341.
- [100] AREIZA-HURTADO M., VEGA-POSADA, C.A., ARISTIZABAL-OCHOA, J.D. *A novel linear matrix method to analyze adhesive joints*. Compos. Struct. 2019, vol. 226, 111193.
- [101] HART-SMITH L.J. NASA-CR-112236; *Adhesive Bonded Single Lap Joints*; NASA: Washington, DC, USA, 1973.

- [102] HART-SMITH L.J. NASA-CR-112235; *Adhesive Bonded Double-Lap Joints*; NASA: Washington, DC, USA, 1973.
- [103] DOBRZAŃSKI P., OLEKSIK W. *Design and analysis methods for composite bonded joints*. Transactions on Aerospace Research, 2021, vol. 262, pp. 45–63.
- [104] European Committee for Standardization. EN 10025-2:2004 *Hot Rolled Products of Structural Steels—Part 2: Technical Delivery Conditions for Non-Alloy Structural Steels*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.
- [105] U. S. Steel Košice, s.r.o., certyfikat materiału nr 19/301122 01 – z dnia: 07.01.2019.
- [106] ArcelorMittal, certyfikat materiału nr 1002956175 – z dnia: 20.05.2021.
- [107] WILCZYŃSKI K. I INNI. *Przetwórstwo tworzyw polimerowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2018.
- [108] Karta techniczna S&P Resin 220 (rok aktualizacji karty: 2019) – <https://www.sp-reinforcement.pl> – dostęp do karty: 13.04.2021.
- [109] Karta techniczna kleju 3M Scotch-Weld DP6310NS (rok aktualizacji karty: 2016) – <https://www.3mpolska.pl> – dostęp: 13.06.2022.
- [110] Karta techniczna kleju Loctite HY4080GY (rok aktualizacji karty: 2017) – <https://www.henkel-adhesives.com> – dostęp: 17.07.2022.
- [111] PASTUSZAK P.D. *Failure analysis of composite structures by thermography: rozprawa doktorska*. Politechnika Krakowska, Kraków, 2015.
- [112] ROMANOWICZ P. *Experimental and numerical estimation of the damage level in multilayered composite plates*. Mater. Werkst. 2018, 49, 591–605.
- [113] BOCZKOWSKA A., KAPUŚCIŃSKI J., LINDEMANN Z., WITEMBERG-PERZYK D., WOJCIECHOWSKI S. *Kompozyty – wydanie II zmienione*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [114] NOWAK, T. *Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmacnianych przy użyciu CFRP – rozprawa doktorska*. Raporty Instytutu Budownictwa. Politechniki Wrocławskiej, 2007, vol. 4, 190.
- [115] ROMANOWICZ P., SZYBIŃSKI B., WYGODA M. *Static and Fatigue Behaviour of Double-Lap Adhesive Joints and Notched Metal Samples Reinforced by Composite Overlays*. Materials, 2022, vol. 15, iss. 9, pp. 1-28.
- [116] ASTM D 3528 (2002), *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading*.
- [117] Instruction manual MTS Landmark™ Floor Standing Load Units Product Information Models 370.10; dostęp: 25 Kwietnia 2022.
- [118] WYGODA M. *Digital Image Correlation Used in Analysis and Monitoring of Mechanical Behavior of Machine Elements*. [W:] Solarczyk P. (red.), The Book of Articles National Scientific Conference "Zrozumieć Naukę", Promovendi Foundation Publishing, Łódź, 2018, pp. 255-262.
- [119] PAN B., QIAN K., XIE H., ASUNDI A. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review*. Measurement Science And Technology, 2009, vol. 20, no 6.
- [120] DYLAĞ Z., JAKUBOWICZ A., ORŁOŚ Z. *Wytrzymałość Materiałów – TOM I*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
- [121] BIELSKI J. *Wprowadzenie do inżynierskich zastosowań metody elementów skończonych – pomoc dydaktyczna*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.
- [122] ZIENKIEWICZ O.C., TAYLOR R.L. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Sixth Edition, Elsevier, 2005.
- [123] SZMELTER J. *Metoda elementów skończonych w mechanice*. Wydawnictwo PWN, Warszawa 1980.
- [124] KRUSZEWSKI J. *Metoda sztywnych elementów skończonych*. Arkady, Warszawa, 1975.
- [125] RAKOWSKI G., KACPRZYK Z. *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1993.
- [126] KLEIBER M. *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*. Wydawnictwo PWN, Warszawa, 1989.
- [127] KLEIBER M. *Komputerowe metody mechaniki ciał stałych*. Mechanika techniczna, Tom XI, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1995.
- [128] WASZCZYŻYŃ Z., CICHON C., RADWAŃSKA M. *Metoda elementów skończonych w stateczności konstrukcji*. Arkady, Warszawa 1990.
- [129] Ansys Software – licencja studencka, www.ansys.com. Dostęp na dzień: 20 Listopad 2021.
- [130] ŁACZEK S. *Modelowanie I Analiza Konstrukcji w Systemie MES ANSYS v.11*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011.

- [131] BĄK R., BURCZYŃSKI T. *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2001.
- [132] POREBSKA M., SKORUPA A. *Połączenia spójnościowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.
- [133] KOWAL M.R. *Wzmacnianie elementów stalowych kompozytami FRP - Rozprawa doktorska*. Politechnika Lubelska, 2015.
- [134] SZYBIŃSKI B., ROMANOWICZ P.J. *Optimization of Flat Ends in Pressure Vessels*. *Materials*, 2019, vol. 12, 4194.
- [135] ROMANOWICZ P.J., SZYBIŃSKI B. *Determination of Optimal Flat-End Head Geometries for Pressure Vessels Based on Numerical and Experimental Approaches*. *Materials*, 2021, vol. 14, 2520.
- [136] KOZŁOWSKI M. *Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams – PhD thesis*. Silesian University of Technology, Gliwice, 2014.
- [137] MARTÍN F.J.B., CONNOR, R.J. *Load-induced fatigue category of hand holes and manholes*. Purdue e-Pubs 2017.
- [138] WOO J., NA W.B. *Effect of cutout orientation on stress concentration of perforated plates with various cutouts and bluntness*. *International Journal Ocean System Engineering*, 2011, vol. 1, pp. 95-101.
- [139] OZKAN M.T., TOKTAS, I. *Determination of the stress concentration factor (K_t) in a rectangular plate with a hole under tensile stress using different methods*. *Material Testing*, 2016, vol. 58, pp. 839–847.
- [140] Rudawska A. *Oprzrządowanie w technologii klejenia*. Monografia, Politechnika Lubelska, 2016.
- [141] Savruk M.P., Kazberuk A. *Stress Concentration at Notches*. Springer, 2016.

STRESZCZENIE

W pracy podjęto tematykę wzmocnień stalowych elementów konstrukcji z korbami za pomocą nakładek kompozytowych. We wstępnych rozważaniach przedstawiono ogólny stan wiedzy w zakresie tematu oraz podejście do rozwiązania zagadnień związanych z zastosowaniem klejonych nakładek wzmacniających. W opisie zawarto informacje na temat badanych materiałów i geometrii próbek, a także narzędzi inżynierskich w przeprowadzonych pracach badawczych. Przeprowadzone badania były poświęcone znalezieniu najsłabszego elementu połączenia klejowego. Elementem tym okazał się być klej. Szczegółowe badania połączenia klejowego przeprowadzono dla symetrycznych połączeń zakładkowych (ang. *DLJ*), poddanych obciążeniom statycznym i zmęczeniowym. W kolejnym korbku przeprowadzono badania konstrukcji z korbami, porównując wpływ małej i dużej powierzchni wzmocnienia nakładki kompozytowej. Otrzymane wyniki porównano z do wyników uzyskanych dla próbek nie posiadających wzmocnienia. Jako kryterium wykorzystano zmianę liczby cykli do zniszczenia próbki. Uzyskane wyniki analiz pozwalają na określenie metod podnoszenia trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej w zależności od rodzaju zastosowanego wzmocnienia. W badaniach wykazano, że zastosowanie wzmocnienia stalowych elementów konstrukcyjnych z korbami w postaci kompozytowych nakładek pozwala na zwiększenie trwałości zmęczeniowej badanych elementów.

Słowa kluczowe: *konstrukcja, karb, spoiwo, wzmocnienie, zmęczenie, nakładki, kompozyt*

SUMMARY

In thesis author deals with the subject of steel structural elements with notches reinforced by means of the composite overlays. In the beginning, the general state of the knowledge is presented, and the approach to solving issues related to bonded reinforcements is discussed. The detailed information about the tested materials, the geometry of the samples and engineering tools applied in the study is described. The performed analyses were focused on the search of the weakest points of the adhesive joints. The bond applied in the joint was just this item. The detailed studies of adhesive connection were carried out for the double lap joint (*DLJ*) samples, subjected to static and fatigue loads. In the next step the investigations of the notched reinforced structural elements were carried out. Here, the influences of the small and large size of reinforcing overlays were studied. The obtained results were compared to samples without reinforcement and presented in the form of fatigue life cycles. The increase of the number of the cycles to the failure was the measure in this case. The performed analyses contain information about the way of the methods of increasing durability and load carrying capacity dependent from the kind of the reinforcement applied. It was proved that reinforcing of structural elements with notches by means of the composite overlays gives satisfactory results.

Keywords: *structure, notch, adhesive, reinforcement, fatigue, overlays, composite*

Zestawienie Rysunków:

Rysunek 1.1.	a) Rozciągany płaski element konstrukcyjny z umiejscowionym karbem na środku płyty pod kątem θ , b) otwór kołowy, c) elipsa pozioma d) elipsa pionowa, e) otwór kwadratowy lub prostokątny, f) otwór trójkątny, g) otwór owalny, h) otwór „prawie” eliptyczny opisany równaniem, i) otwór o kształcie specjalnym opisany równaniem [13,14].	11
Rysunek 1.2.	Izotropowa płyta z otworem kołowym: a) z charakterystycznymi wymiarami służącymi do określenia K_t poprzez dostępny uproszczony opis matematyczny (1.1), b) rozkład naprężeń na krawędzi karbu [22].	11
Rysunek 1.3.	Schematyczny rysunek rodzajów uszkodzeń [34,48].	15
Rysunek 1.4.	Krzywa Wöhlera dla wybranej stali oraz oczekiwane wyniki dla badanego elementu z karbem bez i ze wzmocnieniem nakładką kompozytową.	19
Rysunek 1.5.	Uproszczony schemat prowadzenia badań.	20
Rysunek 2.1.	Geometria i kształt badanych elementów złącza klejowego typu DLJ.	23
Rysunek 2.2.	Geometria i kształt badanych elementów konstrukcji z otworem: a) element bez wzmocnienia; b) element wzmocniony nakładką 45×45 – wzmocnienie typu +A; c) element wzmocniony czterema prostokątnymi pasami 15×180 – wzmocnienie typu +B.	25
Rysunek 2.3.	Oprogramowanie i system sterowania maszyną wytrzymałościową.	28
Rysunek 2.4.	Stanowisko badawcze: a) maszyna wytrzymałościowa MTS Landmark 370.10; b) stanowisko z oprzyrządowaniem do cyfrowej korelacji obrazu (DIC).	28
Rysunek 2.5.	Uproszczony schemat stanowiska badawczego – technika cyfrowej korelacji obrazu DIC.	29
Rysunek 2.6.	Schematyczna ilustracja elementu przed i po deformacji: a) zdjęcie referencyjne; b) zdjęcie prezentujące deformację obiektu. [119]	30
Rysunek 3.1.	Schematy połączenia elementów: a) połączenie zakładkowe; b) połączenie zakładkowe z ukosowaniem; c) zakrzywione połączenie klejowe; d) rdzeń łączony podwójną zakładką; e) rdzeń łączony podwójną nakładką z ukosowaniem; f) łączenie elementów poprzez pojedynczą nakładkę; g) łączenie elementów podwójną nakładką (double-lap joint - DLJ); h) łączenie elementów z fazowanymi nakładkami; i) połączenie schodkowe przesunięte; j) połączenie schodkowe proste; k) połączenie o ukosowanej powierzchni; l) połączenie z podwójnym ukosowaniem do kąta ostrego; m) wzmacniające podwójne nakładki na litym elemencie; n) wzmacniająca pojedyncza nakładka na litym elemencie.	34
Rysunek 3.2.	Schematy kształtów zakończenia spoiny klejowej względem nakładki [133].	35
Rysunek 3.3.	Formy zniszczenia połączenia klejowego: a) adhezyjne; b) poprzez odrywanie; c) kohezyjne; d) poprzez odrywanie połączone z zniszczeniem kohezyjnym spoiny; e) forma mieszana zniszczenia adhezyjnego i kohezyjnego; f) zniszczenie poza miejscem połączenia klejowego.	35
Rysunek 3.4.	Podwójne połączenie zakładkowe: a) geometria, wymiary i własności materiałowe; b) działające siły w badanym połączeniu w kierunku x.	36
Rysunek 3.5.	Model FEM: a) warunki brzegowe modelu wraz z oznaczeniem materiałów; b) część modelu FEM z dyskretyzacją elementów skończonych.	39
Rysunek 3.6.	Krzywe rozciągania próbek typu DLJ dla dwóch wariantów materiału nakładek.	40
Rysunek 3.7.	Formy zniszczenia połączeń klejonych typu DLJ: a) stal-stal (próbka 1); b) stal-kompozyt (próbka 11).	40
Rysunek 3.8.	Wyniki analizy DIC dla połączenia zakładkowego stal S355J2 (rdzeń) – S&P 150/2000 (nakładki): a) przemieszczenie pionowe u_x ; b) odkształcenie ϵ_x	41
Rysunek 3.9.	Rozkład znormalizowanego odkształcenia na środku powierzchni próbki DLJ dla nakładek kompozytowych S&P 150/2000 – wyniki DIC i FEM.	42
Rysunek 3.10.	Rozkład przemieszczeń pionowych u_x (DIC) na środku powierzchni próbki typu DLJ z nakładkami kompozytowymi.	43
Rysunek 3.11.	Rozkład znormalizowanego naprężenia ścinającego kleju w złączu DLJ dla naprężeń wyznaczonych numerycznie, oraz analitycznie dla: a) próbki 1 z nakładkami stalowymi; b) dla próbki 11 z nakładkami kompozytowymi SP150/2000.	44
Rysunek 3.12.	Rozkład znormalizowanego naprężenia odrywającego w kleju dla próbek DLJ.	45

Rysunek 3.13.	Wyniki testów zmęczeniowych dla próbek typu DLJ dla $R=0,1$	46
Rysunek 3.14.	Formy uszkodzeń próbek z nakładkami stalowymi dla maksymalnych naprężeń ścinających: a) $\tau_{max,FAT}=18.35$ MPa; b) $\tau_{max,FAT}=13.48$ MPa; c) $\tau_{max,FAT}=11.96$ MPa.	47
Rysunek 3.15.	Formy zniszczenia próbek z nakładkami kompozytowymi S&P 150/2000 dla maksymalnych naprężeń ścinających: a) $\tau_{max,FAT}=11.03$ MPa; b) $\tau_{max,FAT}=10.36$ MPa.	48
Rysunek 3.16.	Przyrost odkształcenia ϵ_{TOT} w funkcji zadanej liczby cykli N_f dla próbek typu DLJ stal-stal.	49
Rysunek 3.17.	Wykres $\epsilon_{TOT} - N$ dla próbki nr 16 typu DLJ z stalowymi nakładkami. Badanie zrealizowane z narastającymi naprężeniami obciążającymi $\tau_{max,FAT}$	49
Rysunek 4.1.	Wykresy rozciągania ($\sigma - \epsilon_{TOT}$) dla: a) elementu z otworem bez wzmocnienia i ze wzmocnieniem +A; b) Porównanie krzywych rozciągania dla obciążenia F_{Ye} ..	52
Rysunek 4.2.	Rozkład odkształceń lokalnych dla próbki S355J2+N(P1)_bez wzmocnienia dla: a) $\epsilon_{x,local,max}=0.75\%$, $\epsilon_{TOT}=0.3\%$; b) $\epsilon_{x,local,max}=1.50\%$, $\epsilon_{TOT}=0.37\%$; c) $\epsilon_{x,local,max}=5.50\%$, $\epsilon_{TOT}=0.85\%$; d) $\epsilon_{x,local,max}=11.00\%$, $\epsilon_{TOT}=1.48\%$	53
Rysunek 4.3.	Próbka S355J2+N(P1)_bez wzmocnienia z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z zaokrągleniem naroży R2: a) mapa odkształceń prezentująca obszar największych wartości odkształceń o kształcie trapezu; b) forma zniszczenia próbki.	54
Rysunek 4.4.	Rozkład odkształceń lokalnych dla próbki S355J2+N(P1)_SP220_HEX-TV380+A: a) $\epsilon_{x,local,max}=0.30\%$, $\epsilon_{TOT}=0.22\%$; b) $\epsilon_{x,local,max}=0.70\%$, $\epsilon_{TOT}=0.37\%$; c) $\epsilon_{x,local,max}=1.30\%$, $\epsilon_{TOT}=0.48\%$; d) $\epsilon_{x,local,max}=2.00\%$, $\epsilon_{TOT}=0.57\%$	55
Rysunek 4.5.	Rozwój odkształcenia lokalnego na spoinie klejowej wraz z wzrostem całkowitego wydłużenia próbki (ϵ_{TOT}) S355J2+N(P1)_SP220_HEX-TV380+A. ..	56
Rysunek 4.6.	Forma zniszczenia próbki S355J2+N(P1)_SP220_HEX-TV380+A: kolor niebieski zniszczenie połączenia klejowego; kolor czerwony dekohezja rdzenia. ..	57
Rysunek 4.7.	Mapa i wykres odkształceń wokół wzmocnienia dla prostokątnych pasów kompozytowych 15×180 aplikowanych wokół otworu próbki S355J2+N(P1)_SP220_SP150/2000+B - odkształcenie całkowite próbki $\epsilon_{TOT}=0.256\%$	57
Rysunek 4.8.	Mapa odkształceń na zakończeniach spoiny dla prostokątnych pasów kompozytowych 15×180 aplikowanych wokół otworu próbki S355J2+N(P1)_SP220_SP150/2000+B - odkształcenie całkowite próbki $\epsilon_{TOT}=0.256\%$	58
Rysunek 4.9.	Rozkład odkształceń wzdłuż sekcji 1 i 2 od miejsca zakończenia spoiny ($x=0$ mm) do miejsca za karbem ($x=140$ mm) - próbka S355J2+N(P1)_SP220_SP150/2000+B z czterema jednokierunkowymi pasami wzmacniającymi 15×180 z włókna węglowego S&P 150/2000.	59
Rysunek 4.10.	Wygenerowana siatka elementów skończonych: a) widok główny elementu; b) przybliżenie miejsca otworu z zagęszczeniem siatki w miejscach spiętrzenia naprężeń.	62
Rysunek 4.11.	Przykładowe ułożenie kątów orientacji włókien θ wraz z numeracją warstw w modelu numerycznym.	62
Rysunek 4.12.	Rozkład naprężeń σ_y dla elementu bez wzmocnienia dla zaokrąglenia naroży R2.	63
Rysunek 4.13.	Siatka elementów skończonych dla przykładowej próbki z nakładką prostokątną o pełnej szerokości z rzeczywistą grubością poszczególnych warstw w powiększeniu: (a) widok perspektywiczny obszaru nakładki; b) szczegól obszaru narożnego nakładki.	64
Rysunek 4.14.	Rozkład naprężeń rozciągających σ_y w płycie stalowej dla nakładki kołowej $R_{ov}=20,0$ mm i $\theta=0^\circ$: a) w całej próbce (stalowy rdzeń); b) w obszarze części stalowej pod nakładką kołową; c) w warstwie kompozytowej nakładki.	65
Rysunek 4.15.	Rozkład naprężeń rozciągających σ_y w płycie stalowej dla nakładki kołowej $R_{ov}=20,0$ mm dla różnych kątów orientacji włókien: a) $\theta=[+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta=[90^\circ]_8$; c) $\theta=[0^\circ]_8$; d) $\theta=[0^\circ/90^\circ]_4$	66
Rysunek 4.16.	Rozkład naprężeń rozciągających σ_y^{comp} dla wierzchniej warstwy kompozytowej, rozmiar nakładki kołowej $R_{ov}=20$ mm, dla różnych orientacji kątów włókien: a) $\theta=[+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta=[90^\circ]_8$; c) $\theta=[0^\circ]_8$; d) $\theta=[0^\circ/90^\circ]_4$	66
Rysunek 4.17.	Ścieżka C-D użyta do wykreślenia rozkładu naprężeń rozciągających σ_y	67

Rysunek 4.18.	Rozkład naprężeń rozciągających σ_y dla stalowej płyty wzdłuż odcinka C-D przy wzmocnieniu w postaci kompozytowej nakładki o kształcie kołowym dla: a) różnych wartości promienia R_{ov} nakładki kołowej przy stałej orientacji włókien $\theta=0^\circ$; b) różnych kątów orientacji włókien θ przy stałym promieniu nakładki kołowej $R_{ov}=17.5$	67
Rysunek 4.19.	Rozkład naprężeń rozciągających σ_y w płycie stalowej dla nakładki kwadratowej $\square 45 \times 45$ dla kąta orientacji włókien: a) $\theta=[+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta=[90^\circ]_8$; c) $\theta=[0^\circ]_8$; d) $\theta=[0^\circ/90^\circ]_4$	68
Rysunek 4.20.	Rozkład naprężeń rozciągających σ_y^{comp} wierzchniej warstwy nakładki kompozytowej $\square 45 \times 45$ dla różnych orientacji kąta włókien w laminacie: a) $\theta=[+45^\circ/-45^\circ]_4$; b) $\theta=[90^\circ]_8$; c) $\theta=[0^\circ]_8$; d) $\theta=[0^\circ/90^\circ]_4$	69
Rysunek 4.21.	Rozkład naprężeń rozciągających σ_y dla stalowej płyty wzdłuż odcinka C-D przy wzmocnieniu w postaci kompozytowej nakładki o kształcie kwadratowym $\square 45 \times 45$ dla różnych kątów orientacji włókien θ	69
Rysunek 4.22.	Krzywa Wohlera dla przeprowadzonych testów zmęczeniowych dla próbek bez i z nakładkami wzmacniającymi (+A) z materiału Hexcel TVR 380 R-glass $[+45^\circ/-45^\circ]_{4N}$ (spoiwo S&P Resin 220) dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	71
Rysunek 4.23.	Próbka z nakładkami (+A) Hexcel TVR 380 R-glass w formie $\square 45 \times 45$ (spoiwo S&P Resin 220) dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$; $N_f=1\ 000\ 000$ cykli: a) pęknięcie przy fazowaniu równoległe do obciążenia próbki; b) pęknięcie widoczne na grubości próbki w miejscu połączenia klejowego.	73
Rysunek 4.24	.Wykres całkowitego odkształcenia elementu ϵ_{TOT} w funkcji liczby cykli dla próbek bez i z nakładkami Hexcel TVR 380 R-glass w formie $\square 45 \times 45$ (spoiwo S&P Resin 220) dla $\sigma_{max,FAT}=296\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$, stopień obciążenia elementu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=0,81$	73
Rysunek 4.25.	Wykres zmian odkształcenia ϵ_{TOT} w funkcji liczby cykli N dla wybranych próbek (spoiwo S&P Resin 220) z różnym kształtem i materiałem wzmocnienia badanych elementów dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$ przy obciążeniu $\sigma_{max,FAT}=368\text{MPa}$, poziom obciążenia elementu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=1,01$	75
Rysunek 4.26.	Formy zniszczenia elementów $S355J2+N(P1)$ wzmocnionych różnymi nakładkami obciążonych $\sigma_{max,FAT}=368\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$: a) HEXCEL TVR380 R-glass $[+45^\circ/-45^\circ]$, +A; b) E-glass woven roving/epidian 601 $[0^\circ/90^\circ]$, +A; c) S&P C-Laminate 150/2000 $[0^\circ]$, +A; d) S&P C-Laminate 150/2000 $[0^\circ]$, +B.	76
Rysunek 5.1.	Wykres $\epsilon_{TOT} - N$ dla stalowych ($S355J2+N(P2)$) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R_2 – bez wzmocnienia – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	80
Rysunek 5.2.	Wybrany przełom zmęczeniowy dwóch części elementu bez wzmocnienia $S355J2+N(P2)$ _bez wzmocnienia (1), $N_f=38\ 012$	80
Rysunek 5.3.	Wykres $\kappa_n/\kappa_0 - N$ dla stalowych ($S355J2+N(P2)$) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R_2 – bez wzmocnienia – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	81
Rysunek 5.4.	Wykres $\epsilon_{TOT} - N$ dla stalowych ($S355J2+N(P2)$) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R_2 – spoiwo S&P Resin 220 – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	81
Rysunek 5.5.	Wykres $\kappa_i/\kappa_0 - N$ dla stalowych ($S355J2+N(P2)$) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R_2 – spoiwo S&P Resin 220 – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	82
Rysunek 5.6.	Formy uszkodzenia zakończeń połączenia klejowego nakładki wzmacniającej (czerwone i żółte strzałki) dla wybranej liczby cykli - próbka $S355J2+N(P2)$ _SP220_SP150/2000+B (1), $N_f=56\ 283$	83
Rysunek 5.7.	Wybrany przełom zmęczeniowy dwóch części elementu dla spoiwa S&P Resin 220: a) $S355J2+N(P2)$ _SP220_SP150/2000+B (1) – $N_f=56\ 283$; b) $S355J2+N(P2)$ _SP220_SP150/2000+B (2) – $N_f=94\ 423$	83

Rysunek 5.8.	Wykres $\epsilon_{TOT} - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo 3M Scotch-Weld DP6310DS – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	82
Rysunek 5.9.	Wykres $\kappa_i/\kappa_0 - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo 3M Scotch-Weld DP6310NS – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	84
Rysunek 5.10.	Formy uszkodzenia zakończeń połączenia klejowego nakładki wzmacniającej (czerwone strzałki) dla wybranej liczby cykli: a) próbka S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1) – $N_f = 172\ 184$; b) próbka S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3) – $N_f = 147\ 973$	85
Rysunek 5.11.	Przelomy zmęczeniowe elementów dla spoiwa 3M Scotch-Weld DP6310NS: a) S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1) – $N_f = 172\ 184$; b) S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3) – $N_f = 147\ 973$	86
Rysunek 5.12.	Wykres $\epsilon_{TOT} - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo Loctite HY4080GY – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	87
Rysunek 5.13.	Wykres $\kappa_i/\kappa_0 - N$ dla stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 – spoiwo Loctite HY4080GY – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	87
Rysunek 5.14.	Przykładowa forma uszkodzenia stalowego rdzenia w miejscu karbu – nakładki bez uszkodzeń – próbka: S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3) – $N_f = 322\ 730$	88
Rysunek 5.15.	Przełom zmęczeniowy stalowych elementów z karbem dla spoiwa: a) Loctite HY4080GY – próbka: S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2) – $N_f = 382\ 054$; b) Loctite HY4080GY – próbka: S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3) – $N_f = 322\ 730$	88
Rysunek 5.16.	Porównanie odkształcenia całkowitego (ϵ_{TOT}) w funkcji liczby cykli (N) dla wybranych najwyższych trwałości stalowych (S355J2+N(P2)) elementów konstrukcji z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ z promieniem zaokrąglenia naroży R2 wzmocnionych nakładkami kompozytowymi dla wybranych typów klejów strukturalnych – przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396\text{MPa}$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$ - przy obciążeniu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=0,93$	89
Rysunek 5.17.	Schemat wykonywanych pomiarów grubości warstwy kleju na próbkach wzmocnionych nakładkami kompozytowymi w formie prostokątnych pasów (+B) wykonanych z jednokierunkowego włókna węglowego S&P C-Laminate 150/2000.	90
Rysunek 5.18.	Rozkład uśrednionej grubości warstwy kleju dla próbki S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (4), $N_f=65\ 577$	103
Rysunek 5.19.	Rozkład uśrednionej grubości warstwy kleju dla próbki S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3), $N_f=147\ 973$	103
Rysunek 5.20.	Rozkład uśrednionej grubości warstwy kleju dla próbki S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2), $N_f=382\ 054$	104
Rysunek 5.21.	Wybrane fotografie ukazujące charakter zniszczenia spoiwa.	105
Rysunek 5.22.	Geometryczny model elementu z nakładkami w formie pasów wzmacniających (+B).	106
Rysunek 5.23.	Fragment siatki elementów skończonych: a) w otoczeniu karbu; b) przy zakończeniu usksowania spoiwy klejowej.	107
Rysunek 5.24.	Wybrane elementy z otworami z dwustronnym wzmocnieniem w postaci pasów wykonanych z taśmy SP150/2000 (CFRP) dla różnych typów spoiwa przy obciążeniu $F_{max}=47,5\text{ kN}$: a) S355J2(P2)_SP220_SP150/2000+B (3); b) S355J2(P2)_DP6310_SP150/2000+B (2); c) S355J2(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2); d) odkształcenie ϵ_y [%].	108
Rysunek 5.25.	Wybrane formy zniszczenia próbek.	109
Rysunek 5.26.	Procentowa ocena zjawisk zachodzących w połączeniach klejowych.	110
Rysunek 5.27.	Wybrane przelomy zmęczeniowe dla różnych typów spoiwa.	112
Rysunek 5.28.	Wyniki analiz DIC dla wybranych próbek w danej fazie badania (N/N_f).	113

Zestawienie Tabel:

Tabela 2.1.	<i>Skład chemiczny stali S355J2+N.</i>	22
Tabela 2.2.	<i>Własności mechaniczne stali S355J2+N.</i>	22
Tabela 2.3.	<i>Własności mechaniczne klejów strukturalnych.</i>	22
Tabela 2.4.	<i>Własności mechaniczne wybranych wzmocnień kompozytowych [115].</i>	24
Tabela 2.5.	<i>Zbiornicze zestawienie próbek wykorzystanych do realizacji badań.</i>	26
Tabela 2.6.	<i>Podstawowe dane techniczne maszyny wytrzymałościowej [117,118].</i>	27
Tabela 3.1.	<i>Wartości wskazanych sztywności próbek typu DLJ.</i>	48
Tabela 4.1.	<i>Porównanie odkształceń elementów (S355J2+N(P1)) z otworem $\square 15 \times 15$ bez i ze wzmocnieniem dla zadanego naprężenia (σ) rozciągającego równego granicy plastyczności Y_{eH}.</i>	53
Tabela 4.2.	<i>Wartość wyznaczonego spiętrzenia naprężeń K_t wraz z obliczonymi współczynnikami dla próbki o szerokości $W=45$ [mm], długości $L=300$ [mm], grubości $t=4$ [mm] z otworem $\square 15 \times 15$ z zaokrągleniem naroży R2.</i>	60
Tabela 4.3.	<i>Wyniki numeryczne dla materiału HEXCEL TVR380, szerokość $W=45$ mm, grubość stalowej płyty (rdzenia) $t=4$ mm, $\sigma_{nom}=8,33$ MPa, ($F=1kN$), otwór kwadratowy $\square 45 \times 45$ o promieniu zaokrąglenia naroży R2, dwie nakładki po 8 warstw każda – grubość jednej nakładki $t_{ov}=2$ mm, θ – orientacja kąta włókna w warstwach względem kierunku rozciągania.</i>	70
Tabela 4.4.	<i>Wyniki analizy numerycznej dla różnych form wzmocnienia, szerokość całego elementu $W=45$ mm, grubość stalowej płyty (rdzenia) $t=4$ mm, $\sigma_{nom}=8,33$MPa, ($F=1kN$), otwór kwadratowy z zaokrągleniem naroży o promieniu R2.</i>	71
Tabela 4.5.	<i>Porównane trwałości zmęczeniowej elementów bez oraz z nakładkami (+A) o grubości $t_{ov}=2$mm, Hexcel TVR 380 R-glass $[+45^\circ/-45^\circ]_{4N}$ o kształcie kwadratu $\square 45 \times 45$ (spoiwo S&P Resin 220) dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.</i>	72
Tabela 4.6.	<i>Porównane trwałości zmęczeniowej elementów bez i z nakładkami w różnej konfiguracji materiału i kształtu przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=368$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$, poziom obciążenia elementu $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=1,01$.</i>	74
Tabela 5.1.	<i>Porównane trwałości zmęczeniowej N_f elementów wykonanych z S355J2+N(P2) z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ R2 bez i z wzmocnieniem typu +B dla wybranych typów spoiwa przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$ MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$, stopień obciążenia $\sigma_{max,FAT}/Y_{eH}=0,93$.</i>	79
Tabela 5.2.	<i>Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (1) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.</i>	92
Tabela 5.3.	<i>Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (2) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max}=396$MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.</i>	93
Tabela 5.4.	<i>Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (3) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.</i>	94
Tabela 5.5.	<i>Grubości warstw spoiwa S&P220 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_SP220_SP150/2000+B (4) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.</i>	95
Tabela 5.6.	<i>Grubości warstw spoiwa DP6310 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (1) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.</i>	96
Tabela 5.7.	<i>Grubości warstw spoiwa DP6310 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (2) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396$MPa dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$.</i>	97

Tabela 5.8.	Grubości warstw spoiwa DP6310 dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_DP6310_SP150/2000+B (3) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	98
Tabela 5.9.	Grubości warstw spoiwa Loctite HY4080GY dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (1) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	99
Tabela 5.10.	Grubości warstw spoiwa Loctite HY4080GY dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (2) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	100
Tabela 5.11.	Grubości warstw spoiwa Loctite HY4080GY dla próbki z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ ze wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B, S355J2+N(P2)_HY4080_SP150/2000+B (3) - przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$	101
Tabela 5.12.	Zestawienie zbiorcze grubości warstw klejów dla wszystkich badanych próbek S355J2+N z otworem kwadratowym $\square 15 \times 15$ R2 z wzmocnieniem S&P C-Laminate 150/2000 +B dla wybranych typów spoiwa przy naprężeniu zmęczeniowym $\sigma_{max,FAT}=396 MPa$ dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0,1$ – przy obciążeniu $\sigma_{max,FAT}/Y_{cH}=0,93$	102