

# METODA WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA DZIAŁANIA KARBU W OPARCIU O METODĘ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH (MES)

## THE METHOD OF DETERMINING AN ACTION COEFFICIENT OF NOTCH BASED ON THE FINITE ELEMENT METHOD (FEM)

Robert Rosik - „Poltegor – Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

*W artykule przedstawiono metodę wyznaczania współczynnika działania karbu w oparciu o metodę elementów skończonych, ze szczególnym uwzględnieniem złączy spawanych oraz ocenę jej przydatności dla miejsc monitorowanych ustroju nośnego koparki SchRs 4000.*

**Słowa kluczowe:** karb, naprężenie, połączenia spawane

*The article presents a method of determining an action coefficient of notch based on the finite element method, with particular emphasis on welded joints, and an assessment of its suitability for monitored locations of the BWE SchRs 4000 load bearing structure.*

**Keywords:** notch, stress, welded joints

### Wstęp

Zjawisko karbu jest jednym z podstawowych zagadnień wytrzymałości zmęczeniowej rozpatrywanym przy kształtowaniu konstrukcji mechanicznych jak i innych.

Pod pojęciem karbu należy rozumieć wszelkie nieciągłości poprzecznych przekrojów przedmiotu lub zmiany krzywizn powierzchni ograniczających przedmiot (rowki, otwory, gwinty) [1],[2]. Działanie karbu jest zależne od geometrii elementów konstrukcyjnych, od rodzaju i kierunku obciążenia, kształtu połączenia i co szczególnie istotne w przypadku połączeń spawanych dodatkowo od kształtu geometrycznego i strukturalnego karbu (niejednorodność wskutek lokalnego przyrostu twardości, wtrącenia żużlowe i tym podobne) [3]. Działanie karbu można przedstawić jako zagęszczenie linii sił, a więc trajektorii punktów przekazujących obciążenie elementarnym cząstkom materiału.

W miejscach zmiany kształtu lub wymiarów obciążonych elementów następuje zmiana rozkładu naprężeń czyli ich spiętrzenie. Mogą one być istotnie większe od nominalnie obliczonych. Mówimy wtedy o działaniu karbu, a uwzględnienie zjawiska karbu (koncentracji, spiętrzenia naprężeń) dla elementów konstrukcyjnych działających pod zmiennym obciążeniem jest niezmiernie ważne, ponieważ np. dla niektórych prędkości zmian naprężeń w elemencie konstrukcyjnym obserwuje się przesunięcie granicy plastyczności w okolice granicy wytrzymałości na rozciąganie. Oznacza to, że materiał plastyczny może ulec kruchemu pękaniu.

### Współczynnik kształtu i współczynnik działania karbu

Teoretyczny wpływ zjawiska karbu opisywany jest współczynnikiem kształtu  $\alpha_k$ , który jest wielkością związaną wyłącznie z geometrią karbu, nie zależy od wielkości obciążenia, bezwzględnych wymiarów elementu oraz rodzaju materiału w stanie sprężystym. Jest wyznaczany doświadczalnie za pomocą tensometrów, elastooptyki oraz obliczeniowo metodami MES i MEB, jak również przy zastosowaniu teorii sprężystości [2].

Trzeba zwrócić uwagę, że rozkłady naprężeń w strefie karbu, a zatem i współczynniki kształtu, obowiązują dla prętów z materiału jednorodnego, liniowo-sprężystego. Jednak spiętrzone na dnie karbu naprężenia wywołują dość szybko plastyczne odkształcenia, zmieniające rozkład naprężeń. Na dnie karbu przestrzennego istnieje więc, dwuosiowy stan naprężeń, co dodatkowo komplikuje uwzględnianie tego we współczynniku kształtu. O ile przy obciążeniach statycznych ten stan plastyczny w obszarze karbu praktycznie nie wpływa na wielkości wytrzymałościowe, to odkształcenia te (wywołane obciążeniem zmiennym) już w małym fragmencie strefy karbu sygnalizują możliwość rozwoju destrukcyjnych zjawisk zmęczeniowych w miarę powiększania się liczby cykli obciążeń przy stosunkowo małym naprężeniu [1]. Odkształcenia te bywają również ujmowane w opisie działania karbu, z czego wyróżnić można postulat H. Neubera o współczynniku kształtu w zakresie sprężysto-plastycznym, którego kwadrat obliczamy

jako iloczyn naprężeniowego i odkształceniowego współczynnika kształtu [1].

Działanie karbu w określonych elementach konstrukcyjnych musi być inne niż w materiale modelowym o liniowej sprężystości. Właściwości materiałów rzeczywistych w bardzo różnym stopniu odbiegają od właściwości ciał wyłącznie sprężystych lub modelowych. Doświadczenie pokazuje, że w rzeczywistości materiały nie są tak wrażliwe na zjawisko karbu, jakby to wynikało z wartości współczynnika  $\alpha_k$ . W przypadku określania wpływu koncentracji naprężeń na wytrzymałość zmęczeniową wprowadza się bardziej praktyczną miarę wpływu spiętrzenia naprężeń tzw. zmęczeniowy współczynnik działania karbu  $\beta_k$  (stosunek wytrzymałości próbek gładkich bez karbu do wytrzymałości próbek gładkich z karbem, zależy to od współczynnika kształtu i współczynnika wrażliwości materiału na działanie karbu).

### Wyznaczanie współczynnika działania karbu

Wykresy doświadczalne dla tak podanej zależności  $\beta_k$  są możliwe jedynie dla ograniczonej liczby przypadków i dotyczą najczęściej cykli wahadłowych. W pewnych sytuacjach łatwiej jest o określenie współczynnika kształtu  $\alpha_k$ , ponieważ jest on dla części przypadków podawany w literaturze, można go też wyznaczyć doświadczalnie czy teoretycznie, choć też nie bez problemów [2]. Z tego też względu już od lat trzydziestych ubiegłego wieku istnieje koncepcja w myśl której oba współczynniki łączy współczynnik wrażliwości na działanie karbu, a wzór na  $\beta_k$  przyjmuje najbardziej znaną postać:

$$\beta_k = 1 + \eta_k (\alpha_k - 1) \quad (1)$$

gdzie:  $\eta_k$  - współczynnik wrażliwości materiału na działanie karbu (jest zależny od  $R_m$  i  $\rho_0$ ) i wynosi 1 dla materiałów doskonale sprężystych (doskonale kruchych, np. szkło), dla materiałów niewrażliwych na działanie karbu (doskonale plastycznych) wynosi 0.

Współczynnik  $\eta_k$  wyznaczany jest głównie z wykresów w zależności od  $R_m$  (wytrzymałość na rozciąganie) i promienia karbu  $\rho$  ale nie jest łatwe ustalenie go, gdyż na jego wartość ma wpływ duża liczba różnych czynników oddziałujących na wrażliwość materiału na zmęczenie, co spowodowało sporą liczbę (kilkanaście) innych propozycji dotyczącej wzoru na  $\beta_k$  wprowadzających inne stałe materiałowe bądź gradient naprężeń.

Sprawa wyznaczania  $\beta_k$  komplikuje się też z tego względu, że jak udowodniono w opracowaniach literaturowych [1], ze wzrostem liczby cykli do zniszczenia stwierdzono wzrost wartości współczynnika  $\beta_k$ , co wydaje się szczególnie istotne przy badaniu i rozpatrywaniu punktów pomiarowych na maszynach pracujących już kilkanaście lat, a mających pracować jeszcze następne długie lata, przy zastosowaniu systemu ciągłego monitoringu stanu wyężenia ustrojów nośnych maszyn górnictwa odkrywkowego.

### Problemy w wyznaczaniu współczynnika kształtu $\alpha_k$ oraz działania karbu $\beta_k$

Wyznaczaniem wartości współczynników kształtu  $\alpha_k$  dla różnych kształtów przedmiotów zajmowało się wielu uczonych

zarówno od strony teoretycznej, jak i doświadczalnej. W oparciu o podstawowe zasady teorii sprężystości wyprowadzone są wzory ogólne, pozwalające wyznaczyć współczynniki  $\alpha_k$  dla konkretnych kształtów przedmiotów. Doświadczalnie natomiast, wyznaczono je przy zastosowaniu metod tensometrycznych i elastooptycznych.

W rozważaniach teoretycznych przyjmuje się wyidealizowany model ciała sprężystego w postaci continuum materialnego, co prowadzi do pewnych kłopotów w interpretacji i aby zbliżyć się do wyników badań doświadczalnych bez większego uzasadnienia przyjmuje się minimalny promień dna karbu  $\rho_m = 0,3$  mm i stosuje ten promień do wszelkich wzorów i dla wszystkich materiałów [2].

Pomiary elastooptyczne przeprowadza się na modelach wykonanych z żywicy przezroczystych. Ponieważ są to ciała bezpostaciowe, zatem nie ma pewności, że lokalne spiętrzenie naprężeń w takich ciałach przebiegać będzie dokładnie tak samo jak w ciałach krystalicznych o dowolnie dużej przy tym wielkości ziarna [2].

Dosyć przekonujące są badania tensometryczne szczególnie wówczas, gdy do badań użyte zostały tensometry o bardzo małych bazach pomiarowych. Wyniki takich badań obarczone są jednak poważnym błędem polegającym na tym, że dotyczą średniej wartości naprężeń w otoczeniu badanego punktu, tj. na długości bazy pomiarowej, a więc nie rejestrują rzeczywistej wartości naprężeń maksymalnych w badanym punkcie ciała.

Dla typowych kształtów częściej stosowanych w budowie maszyn znaleźć można w literaturze różne wartości współczynników  $\alpha_k$  dla identycznych wymiarów i kształtów obiektów - lecz nawet one są często uśredniane względem rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych.

Ze względu na duży rozwój badań przy użyciu metody elementów skończonych wydaje się rozsądne zastosowanie weryfikacji wyników dotychczasowych badań i zapisów norm obliczeniowych dotyczących współczynnika karbu, zwłaszcza dla połączeń spawanych w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego.

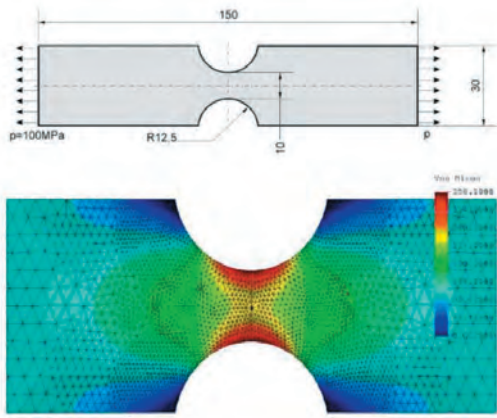
Poważną jednak przeszkodą w zastosowaniu metod obliczeniowych na zmęczenie elementów konstrukcyjnych, szczególnie spawanych, jest brak danych dotyczących właściwości zmęczeniowych materiałów i różnego rodzaju złączy spawanych. Lukę w tym zakresie wypełniają tzw. wykresy projektowe opracowane przez różne instytucje m.in. International Institute of Welding (IIW) [4].

### Wyznaczanie współczynnika kształtu w próbie 2U przy pomocy MES

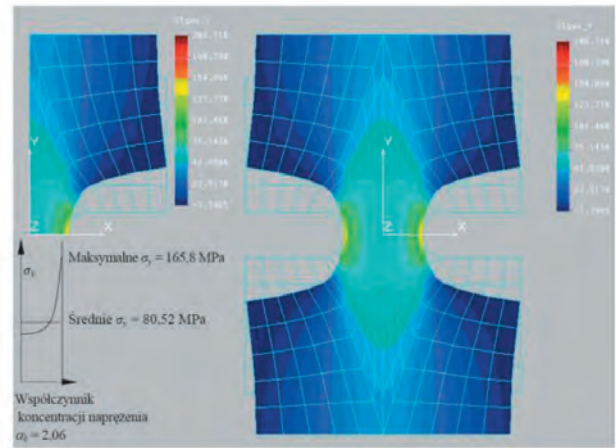
Dla wstępnej oceny przydatności programu Inventor do badań omawianych tutaj współczynników posłużyła próbka z karbem 2U, przedstawiana w literaturze [5] (rys. 1).

Tego typu zadania można rozpatrywać symetrycznie [6] i przy użyciu innych elementów skończonych (rys. 2). Należy jednak zwrócić uwagę na zwiększanie dokładności obliczeń przy pomocy zagęszczania siatki bądź doboru innych elementów skończonych jak widać na rysunkach 1 i 2. W niniejszych badaniach niestety nie można było swobodnie modyfikować siatki ani dobierać elementu skończonego.

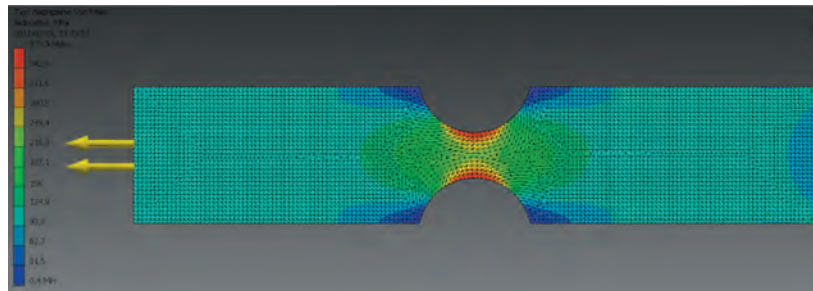
Wyniki badań (rozkład oraz wartości naprężeń) są zbieżne z literaturowymi i teoretycznymi przewidywaniami, co wydaje się potwierdzać słuszność przyjętych założeń (rys. 3). Dla



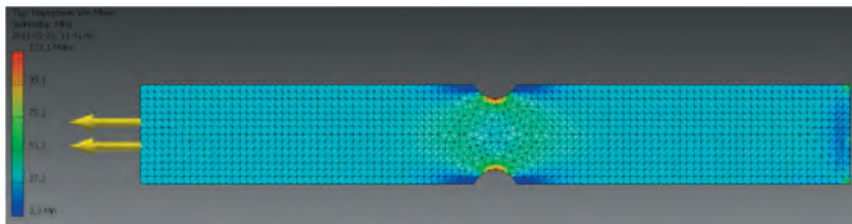
Rys. 1. Wymiary, schemat oraz wyniki badań próbki z karbem [5]  
 Fig. 1. Dimensions, diagram and test results of the notched sample



Rys. 2. Określenie koncentracji naprężeń przy symetrycznej próbce [6]  
 Fig. 2. Determination of stress concentration with a symmetrical sample



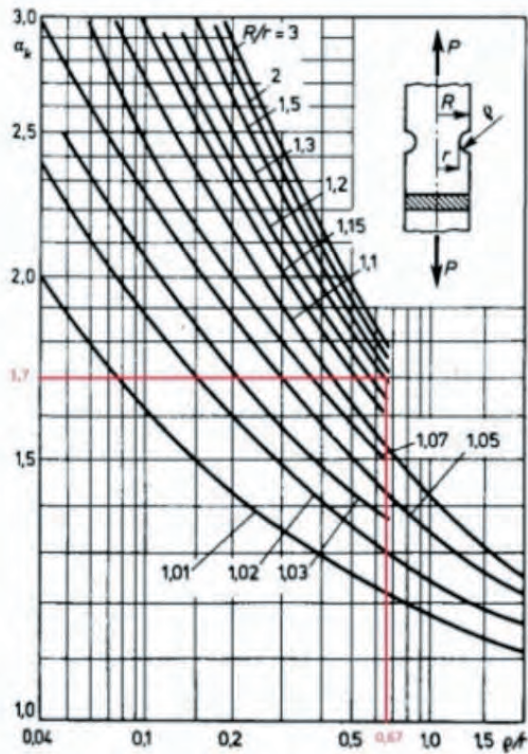
Rys. 3. Wyniki badań próbki z karbem (2U)  
 Fig. 3. Notched sample test results (2U)



Rys. 4. Próbkę z karbem 2U dla zbadania wpływu grubości na współczynnik kształtu  
 Fig. 4. Notched sample 2U to investigate the effect of thickness on the aspect ratio



Rys. 5. Wyniki badań próbki z karbem 2U przy pomocy MES  
 Fig. 5. Test results of a 2U notched sample using FEM



Rys. 6. Wyznaczenie współczynnika kształtu dla próbki  $R=2,1$ ,  $r=1,5$ ,  $\rho=1$  [1]  
Fig. 6. Determination of the aspect ratio for a sample  $R=2,1$ ,  $r=1,5$ ,  $\rho=1$

zbadań wpływu grubości próbki na wartość współczynnika kształtu zbadano inną próbkę (dostosowaną do odczytu z wykresu [1],[2], rys. 4) w zakresie od 1 do 15 mm. Z wykresu (rys. 5) widać taką zależność, która wykładniczo zbliża się do wartości 1,7, co jest wartością odczytaną z wykresów literaturowych (rys. 6) [1]. Przyjęta metoda w takim przypadku nieznacznie zawyża w bezpieczną stronę współczynnik kształtu.

### Metoda wyznaczania współczynnika karbu konstrukcji spawanej w oparciu o MES

Na wstępie wspomniano już, że doświadczenie pokazuje, iż w rzeczywistości materiały nie są tak wrażliwe na zjawisko karbu, jakby to wynikało z wartości współczynnika  $\alpha_k$ , a w przypadku określania wpływu koncentracji naprężeń na wytrzymałość zmęczeniową wprowadza zmęczeniowy współczynnik

działania karbu  $\beta_k$ , który jednak wymagałby określenia zmęczeniowej wytrzymałości próbki z karbem i bez. Wymagałoby to albo prób doświadczalnych albo bardziej specjalistycznego oprogramowania MES do obliczeń zmęczeniowych – oba rozwiązania mogą okazać się niepraktyczne i nieekonomiczne.

W pracy podjęto więc próbę określenia współczynnika działania karbu  $\beta_k$  przy użyciu programu z funkcją analizy metodą elementów skończonych, wyznaczając nim współczynnik kształtu  $\alpha_k$ , a następnie wyznaczając współczynnik działania karbu  $\beta_k$ . Oba współczynniki łączy bardzo powszechna zależność (1) na współczynnik wrażliwości materiału na działanie karbu  $\eta_k$  (dla stali w stanie surowym  $\eta_k = 0,5-0,9$  [2]).

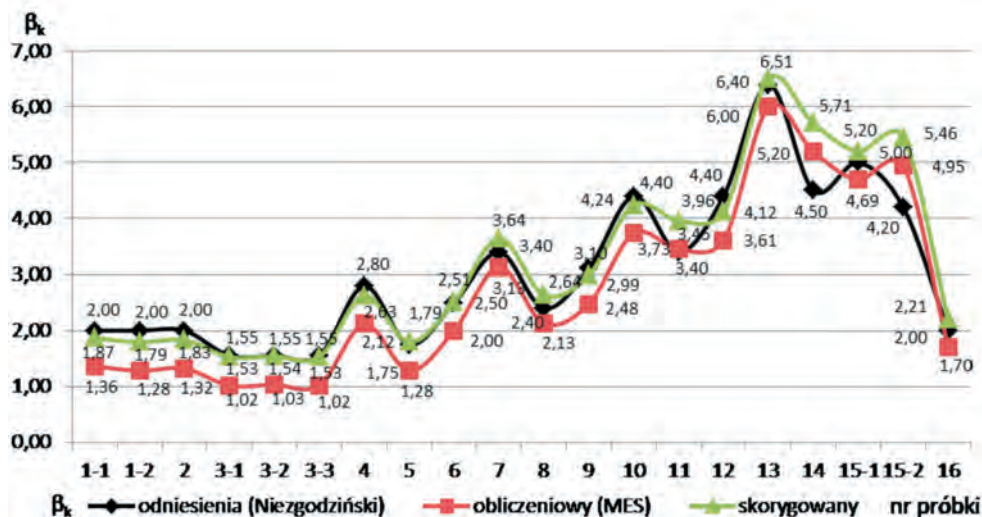
Opierając się na nieco zawyżonej (z założenia metody) wartości współczynnika kształtu i dobierając nieco zaniżony współczynnik wrażliwości materiału na działanie karbu ( $\eta_k = 0,6$ ) oraz modelowaniu rzeczywistego kształtu próbki ze spoinami, oczekiwano wiarygodnej oceny poszukiwanego współczynnika działania karbu.

Porównawczo do badań przyjęto zestawienie zawarte w literaturze [2], które wprost określa wartości poszukiwanego współczynnika (tab. 1). Analogiczne przypadki zostały zamodelowane i poddane analizie.

### Wyniki analizy MES

Wyniki analizy metodą elementów skończonych (tab.1) przy poczynionych założeniach wykazują pewne niedoszacowanie współczynnika działania karbu przy rozpatrywaniu wyników otrzymanych wprost z obliczeń – jest on zaniżony średnio o 25%.

Największe różnice są przy rozpatrywaniu połączeń doczołowych. W tym przypadku z natury tych połączeń różnice w naprężeniach nie powinny być i nie są duże, wręcz minimalne. Trzeba w tym miejscu zwrócić uwagę, że współczynnik do którego się odnosimy uwzględnia także ewentualne wady spawalnicze czy inne względy technologiczne (np. nieciągłości) przy wykonaniu i rozpatrywaniu spoin. Dla dalszej analizy przyjęto więc jako odniesienie wartość współczynnika dla spoiny doczołowej pomniejszoną o wartość dla spoin doczołowych, która wynika z obliczeń MES wprost. Taki parametr nazwano współczynnikiem korekcji a jego wartość ustalono na 0,51. Zabieg taki poprawia wyniki w znaczący sposób, ponieważ są



Rys. 7. Porównanie współczynników działania karbu  
Fig. 7. Comparison of notch performance factors

Tab. 1. Zestawienie wyników analizy MES  
 Tab. 1. Summary of FEM analysis results

	Złącze spawane z analizy MES (Schemat złącza spawanego)		Wartość współczynnika działania karbu $\beta_k$				
			Obliczeniowa wprost	Odniesienia [2]	Błąd	Skory- gowana	Błąd po korekcji
1-1	Jednostronne złącza czołowe z podspawaniem (nie obrabiane)		1,36	2,00	-47,06%	1,87	-6,95%
1-2			1,28		-56,25%	1,79	-11,73%
2	Dwustronne złącze czołowe (nie obrabiane)		1,32	2,00	-51,52%	1,83	-9,29%
3-1	Jedno i dwustronne złącza czołowe (z podspawaniem) obrabiane		1,02	1,55	-52,56%	1,53	-1,57%
3-2			1,03		-50,19%	1,54	-0,52%
3-3			1,02		-51,96%	1,53	-1,31%
4	Jednostronne złącza czołowe bez podspawania (nie obrabiane)		2,12	2,80	-32,25%	2,63	-6,58%
5	Jednostronne złącza czołowe podspawane, nie obrabiane, ukośne		1,28	1,75	-36,72%	1,79	2,23%
6	Złącza z obustronnymi spoinami pachwinowymi z ukosowaniem, nie obrabiane		2,00	2,50	-25,00%	2,51	0,40%
7	Złącza z obustronnymi spoinami pachwinowymi bez ukos., nie obrabiane		3,13	3,40	-8,50%	3,64	6,68%
8	Jednostronna spoina pachwinowa z ukosowaniem, bez podspawania, nie obrabiana		2,13	2,40	-12,76%	2,64	9,04%
9	Jednostronna spoina pachwinowa bez ukosowania, bez podspawania, nie obrabiana		2,48	3,10	-25,00%	2,99	-3,68%
10	Złącza nakładkowe, spoiny wypukłe		3,73	4,40	-17,92%	4,24	-3,74%
11	Złącza nakładkowe, spoiny wklęsłe		3,45	3,40	1,42%	3,96	14,12%
12	Złącze z obustronnymi spoinami pachwinowymi, wypukłymi		3,61	4,40	-22,00%	4,12	-6,88%
13	Jednostronna spoina pachwinowa płaska, nie obrobiona		6,00	6,40	-6,67%	6,51	1,69%
14	Złącze nakładkowe symetryczne		5,20	4,50	13,46%	5,71	21,19%
15-1	Złącze nakładkowe		4,69	5,00	-6,58%	5,20	3,87%
15-2			4,95	4,20	15,08%	5,46	23,01%
16	Płaskownik ze złączem pachwinowym, rozciągany		1,70	2,00	-17,57%	2,21	9,55%

one zawyżone tylko średnio o 2%.

Wartości współczynników działania karbu przedstawiono zbiorczo na rysunku 7.

### Określenie wartości współczynnika karbu dla miejsc monitorowanych koparki SchRs 4000

Zamodelowano dwa różnego typu punkty pomiarowe. Pierwsze z nich to podparcie wieży na nadwoziu obrotowym (rys. 8), drugie to pas dolny podawarki koparki (rys. 9).

Zaproponowana metoda ma na celu umożliwienie określenia zmęczeniowego współczynnika działania karbu w różnych typach konstrukcji. Te dwa przypadki są dość odmienne w swojej istocie.

Podparcie wieży na nadwoziu obrotowym zostało zamodelowane zgodnie z rysunkami konstrukcyjnymi i poddane ścisłaniu. Uwidocznione miejsce koncentracji naprężeń w rozpatrywanej spoinie jest pokazane na rysunku 8. Problematyczne w takim przypadku może być ustalenie naprężenia nominalnego oraz maksymalnego, po analizie jednak można założyć naprężenie nominalne badając okolice występowania koncentracji naprężeń i ustalając takie naprężenie występujące poza strefą tej koncentracji. W przypadku naprężenia maksymalnego trzeba zwrócić uwagę na układ siatki i ewentualne typowe błędy występujące przy metodzie elementów skończonych.

Przyjęcie wartości naprężeń zbyt niskich w przypadku naprężenia nominalnego i zbyt wysokich w przypadku naprężenia maksymalnego prowadzi do niepotrzebnego zawyżenia wartości współczynnika kształtu, a tym samym wartości współczynnika działania karbu.

Dla badanego przypadku (rys. 8) określono:

$$\sigma_n = 23,9 \text{ MPa} ; \sigma_{\max} = 140,5 \text{ MPa} ; \eta = 0,6$$

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = 5,88 \quad \beta_k = 1 + \eta_k (\alpha_k - 1)$$

$$\text{Po korekcji: } \beta_k = 3,93 + 0,51 = 4,44$$

Na podobnej zasadzie zamodelowano pas dolny podawarki (rys. 9). W tym przypadku określenie wartości naprężeń może być o tyle trudne, że ich różnice są nieznaczne, ale można przyjąć łatwiej naprężenia nominalne jako siłę rozciągającą, która występuje w pasie. W przypadku naprężenia maksymalnego trzeba zwrócić uwagę na układ siatki i ewentualne typowe błędy występujące przy metodzie elementów skończonych.

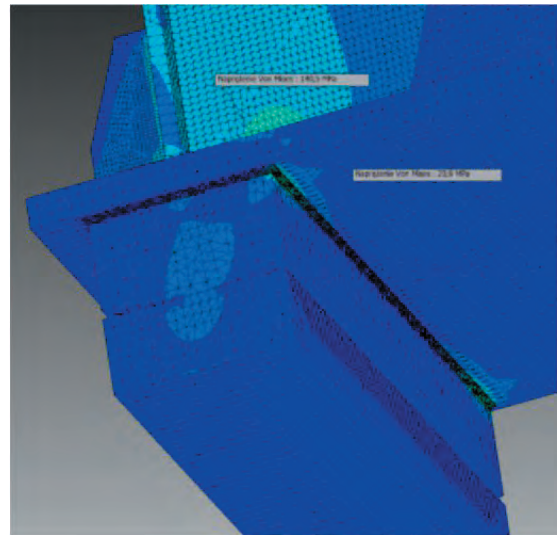
Dla badanego przypadku (rys. 9) określono:

$$\sigma_n = 70 \text{ MPa} ; \sigma_{\max} = 76 \text{ MPa} ; \eta = 0,6$$

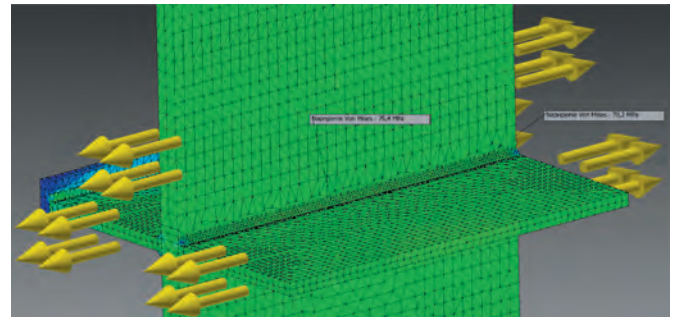
$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = 1,08 \quad \beta_k = 1 + \eta_k (\alpha_k - 1) = 1,05$$

$$\text{Po korekcji } \beta_k = 1,05 + 0,51 = 1,56$$

Współczynnik wrażliwości materiału na działanie karbu  $\eta_k=0,6$  założono tak jak we wcześniejszych badaniach, w przypadku jednak stwierdzenia bądź przypuszczenia większej skłonności materiału lub okolic spoiny na działanie karbu można przyjąć jego wyższą wartość. Wiązać to należy z jakością, klasą wykonania spoiny.



Rys. 8. Podparcie wieży na nadwoziu obrotowym (P1.09;P.10) – model  
Fig. 8. Tower support on a rotating body (P1.09; P.10) - model



Rys. 9. Pas dolny podawarki (P2.19; P2.20) – model  
Fig. 9. Bottom flange of loading elevator (P2.19; P.2.20) - model

### Porównanie wyznaczonych wartości współczynników karbu z danymi ujętymi w normach obliczeniowych

Norma DIN 22261-2 i jej polski odpowiednik PN-G-47000-2 podkreśla, że działanie karbu jest zależne od geometrii elementów konstrukcyjnych, od rodzaju i kierunku obciążenia, kształtu połączenia i co szczególnie istotne w przypadku połączeń spawanych dodatkowo od kształtu geometrycznego i strukturalnego karbu.

Wszelkie te wpływy uwzględniono w zależności od każdej grupy oceny przy ustalaniu wartości w tablicy 21, 22 i 23 (PN-G-47000-2). Grupy oceny obejmują jakość wykonania elementów konstrukcyjnych i połączeń. Cechy dla grup oceny elementów konstrukcyjnych ustalono w tablicy 20 normy PN-G-47000-2, dla połączeń spawanych w PN-G-47000-3 zał. A. Grupa oceny 2 według PN-G-47000-3 odpowiada zwykłym wymaganiom i należy ją wziąć z reguły za podstawę wymiarowania (grupa oceny regularnej). W miejscach o szczególnym znaczeniu dla bezpieczeństwa całej maszyny może być wskazane zastosowanie grup 1 lub 0. Uwzględnienie wyższych dopuszczalnych różnic naprężeń w porównaniu z grupą oceny 2 jest jednak dopuszczalne tylko w porozumieniu z atestatorem [3].

Norma ta nie określa wprost współczynnika działania karbu  $\beta_k$  ani współczynnika kształtu  $\alpha_k$  i współczynnika wrażliwości materiału na działanie karbu  $\eta_k$ . Porównanie jednak naprężeń dopuszczalnych maksymalnych i dla standardowego przypadku obciążenia ( $k=0,0$ ) naprężeń dopuszczalnych, daje pewien obraz wartości współczynników działania karbu. Wyniki takiego oszacowania zamieszczono w tabeli (rys. 10).

Rozciąganie	Numer przypadku karbu											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Napężenia dopuszczalne	180	160	140	125	112	100	90	80	71	63	56	50
Napężenia dopuszczalne maksymalne	257	267	280	250	280	250	300	267	355	315	280	250
$\alpha_k$	1,43	1,67	2,00	2,00	2,50	2,50	3,33	3,34	5,00	5,00	5,00	5,00
$\eta_k$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$\beta_k$	1,26	1,40	1,60	1,60	1,90	1,90	2,40	2,40	3,40	3,40	3,40	3,40
<b>Ściskanie</b>												
Napężenia dopuszczalne	200	178	156	139	124	111	100	89	79	70	62	56
Napężenia dopuszczalne maksymalne	257	267	280	250	280	250	300	267	355	315	280	250
$\alpha_k$	1,29	1,50	1,79	1,80	2,26	2,25	3,00	3,00	4,49	4,50	4,52	4,46
$\eta_k$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$\beta_k$	1,17	1,30	1,48	1,48	1,75	1,75	2,20	2,20	3,10	3,10	3,11	3,08

Rys. 10. Oszacowanie porównawczych współczynników według normy DIN 22261-2 (PN-G-47000-2)

Fig. 10. Comparative estimation of the most commonly used according to standards DIN 22261-2 (PN-G-47000-2)

Dla podparcia wieży na nadwoziu obrotowym (rys. 8) ustalono wartość współczynnika działania karbu  $\beta_k = 4,44$ . Jak wynika z tabeli (rys. 10) dla ściskania najwyższa oszacowana wartość wynosi  $\beta_k = 3,08$ , ale i tak dla tego konkretnego przypadku trudno ustalić w normie adekwatny przykład złącza spawanego.

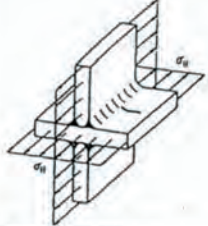
Uwzględniając te aspekty widać, że odniesienie niektórych przypadków konstrukcyjnych do normy może być trudne lub niemożliwe. Określenie takiej wartości  $\beta_k$  przy użyciu proponowanej metody dla nietypowego połączenia daje dość wysoką wartość, jednak w świetle tego, że w normie nie możemy znaleźć właściwego przypadku połączenia, określenie wartości  $\beta_k$  będzie się i tak cechować większą niepewnością, a co za tym idzie założeniem jej większej wartości.

Próbując odnieść ten przypadek do tabeli 1 przy założeniu że przypadek ten jest wystarczająco podobny do przypadku 12, gdzie dla ściskania określono wartość  $\beta_k = 4,4$  [2] można więc wyznaczyć wartość  $\beta_k = 4,44$  uznać za miarodajną.

Dla pasa dolnego podawarki (rys. 9) ustalono wartość współczynnika działania karbu  $\beta_k = 1,56$ . Według normy założyć można przypadek złącza ściskanego (rys. 11). Zakładając grupę oceny regularnej, liczba znamionowa przypadku karbu wynosi 3 bądź 4 w zależności od cech spoiny. Według tabeli (rys. 10) oszacowano, że wartość  $\beta_k = 1,6$ , co ma bardzo zbliżoną wartość do wartości współczynnika obliczeniowego ( $\beta_k = 1,56$ ) przy zastosowaniu MES.

## Podsumowanie

Rozpatrywanie poszczególnych wyników wskazuje na wiele aspektów modelowania i obliczeń współczynnika działania karbu. Modelowane próbki zachowują się w sposób oczekiwany zgodnie z założeniami teoretycznymi, jednak sama metoda elementów skończonych wprowadza pewien błąd a dodatkowo niemożność dowolnego doboru elementów siatki i jej modyfikowania utrudnia idealne zamodelowanie próbki. Pojawiają się z tego względu także

Złącza taśmowe (dwustronne) Kształt konstrukcyjny i obciążenia	Rodzaje złącza <sup>2)</sup>	Grupa oceny <sup>3)</sup>	Dop. $\Delta\sigma$ lub Dop. $\Delta\epsilon$	Liczba znamionowa przypadku karbu K dla tabeli 24	Przekrój obliczeniowy
	DBT	1	160	$K_c$ 2	Element konstrukcyjny
		2	140	3	
		3	125	4	
		4	112	5	
	DET NBTc NBT NET	1	140	$K_c$ 3	
		2	125	4	
		3	112	5	
		4	100	6	

Rys. 11. Pas dolny podawarki (P2.19; P2.20) – przypadek normowy według DIN 22261-2 (PN-G-47000-2)

Fig. 11. Bottom flange of loading elevator (P2.19; P2.20) – standard case according to DIN 22261-2 (PN-G-47000-2)

problemy z odczytem wartości naprężeń w niektórych niewaligicznych miejscach koncentracji naprężeń.

Sposób modelowania jest istotną sprawą przy tego typu analizach. Powyższe wyniki bazowały na modelach jak najbardziej uwzględniających strukturę i kształt złączy. Uwzględniono spoiny, ich kształt i rozmiar, a także luzy pomiędzy blachami przy połączeniach pachwinowych. Dla porównania w analizie zamodelowano też niektóre złącza w sposób jednolity tzn. blachy i spoiny zostały potraktowane jako jedna całość. Test taki zawyża wyniki i wskazuje, że modelowanie rzeczywiste może dawać wyniki bardziej prawidłowe. Mimo tego wydaje się godne rozpatrzenia zamodelowanie bardziej skomplikowanych kształtów w sposób jednolity. Na pewno warta uwagi byłaby też analiza przynajmniej niektórych złączy w programie umożliwiającym modelowanie powłokowe.

Metoda zaprezentowana w niniejszym opracowaniu może budzić pewne obawy lecz otrzymane wyniki próbek są jednak obiecujące. Choć uwzględnia się dość dużą korekcję, to wydaje się ona być uzasadniona z powodu niewiadomej klasy wykonania spoiny. Przy złączach spawanych gdzie klasa wykonania spoiny jest wysoka, wartość korekcji może być znacznie mniejsza. Dla złączy doczołowych zwłaszcza obrabianych z podspawaniem obliczenia MES wykazują mniejsze wartości współczynnika działania karbu. Wartość korekcji należy uzależnić więc od klasy spoiny.

Problem koncentracji naprężeń w złączach spawanych jest na tyle skomplikowany, że wymaga analiz zmęczeniowych lub często też złożonych rozważań na gruncie teorii (m. in. sprężystości). Wszystkie te analizy są czasochłonne i trudne ale uwzględniają więcej właściwości spoin i elementów łączonych [7],[8],[9].

Porównanie wyników obliczeń z ustaleniami normowymi nie daje jednoznacznych wniosków z powodu struktury normy jak i nietypowości niektórych węzłów konstrukcyjnych. Wydaje się jednak, że metoda może być miarodajna lecz wymaga dokładnej oceny klasy spoiny oraz ewentualnego doboru wartości korekcji z nią związanej.

Ważnym aspektem jest też efekt skali konstrukcji, gdyż w ustrojach nośnych mamy do czynienia z dużymi elementami, w których to może zachodzić zwiększone prawdopodobieństwo niejednorodności materiału, a co za tym idzie podatności na zmęczeniowe działanie karbu [1]. W metodzie opartej o MES te zastrzeżenia są uwzględniane we współczynniku korekcyjnym.

## Literatura

- [1] Kocańda S., Szala J., *Podstawy obliczeń zmęzeniowych*. PWN, Warszawa 1991
- [2] Niezgodziński M. E., Niezgodziński T., *Obliczenia zmęzeniowe elementów maszyn*. PWN, Warszawa 1973
- [3] DIN 22261-2 (PN-G-47000-2)
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers, 2006. *FITNET Fitness-for-Service Procedure - Final Draft MK7*
- [5] Rusiński E., Czmochowski J., Smolnicki T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*. Oficyna Wydawnicza PWR 2000
- [6] Śródka W., *Trzy lekcje metody elementów skończonych*, Oficyna Wydawnicza PWR 2004
- [7] Markiewicz I., *Analiza połączenia spawanego zaprojektowanego metodami nośności granicznej, Eksploatacja i Niezawodność* nr 3/2008
- [8] Uhl T., Lasko G., *Komputerowe wspomaganie w analizie trwałości zmęzeniowej konstrukcji*, TTS Technika Transportu Szybowego 2004, R. 11, nr 12, s. 62-66
- [9] Dong P., Hong J., Hong J.K., *Residual Stresses, Notch Stresses, and Stress Intensities at Welds, An Unified Assessment Procedure with Self-Consistency*, Transactions, 2001

