

PROJEKTOWANIE PLASTYCZNE A WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA PASMA Z OTWORAMI (*)

LECH DIETRICH (WARSZAWA)

W pracy przedstawiono wyniki badań statycznych i zmęczeniowych przy rozciąganiu pasma z pięcioma otworami. Określono wpływ odległości między rzędami otworów na ograniczoną wytrzymałość przy 10^5 cyklach dla dwóch programów obciążeń. W pierwszym utrzymywano zerową wartość minimalnej siły w cyklu, w drugim stałą wartość średniego naprężenia dla wszystkich próbek. Wyznaczoną z doświadczeń optymalną odległość między rzędami otworów porównano z jej teoretycznymi ocenami obliczonymi na podstawie kinematycznie dopuszczalnego mechanizmu zniszczenia i statycznie dopuszczalnego pola naprężenia.

I. WSTĘP

W praktyce inżynierskiej, projektując różnego rodzaju połączenia nitowe lub śrubowe płaskich elementów, należy wyznaczyć kształt i wymiary łączników osłabionych kilkoma otworami. Zwykle w takich przypadkach otwory rozmieszczone są w kilku rzędach przesuniętych względem siebie. Powtarzającym się elementem takiego połączenia jest prostokąt z pięcioma otworami. Prawidłowe obliczenie jego nośności granicznej i określenie optymalnych wymiarów ma więc istotne znaczenie praktyczne.

Zagadnienie to było rozpatrywane w pracach [1, 2 i 3], gdzie podano rozwiązania dla pewnych proporcji wymiarowych. Szersze ujęcie tematu można znaleźć w monografii W. SZCZEPIŃSKIEGO [4]. Przedstawiono tam statycznie dopuszczalne pola naprężeń i kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia dla różnego stosunku średnicy otworów do szerokości pasma d/b i różnej odległości S między rzędami otworów. Na podstawie zamieszczonych tam rozwiązań określono odpowiednio dolną i górną ocenę nośności granicznej interesującego nas pasma z pięcioma otworami. Wytrzymałość takiego elementu o danej szerokości zależy od średnicy otworów i od ich rozstawienia określonego wymiarami t i S (oznaczenia wymiarów podano na rys. 1).

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu jednego tylko parametru S , oznaczającego odległość między rzędami otworów, na wytrzymałość zmęczeniową całego elementu. Pozostałe wielkości, średnica otworów d i odległość między nimi t były stałe. Dla tak postawionego zadania możemy na podstawie wspomnianych

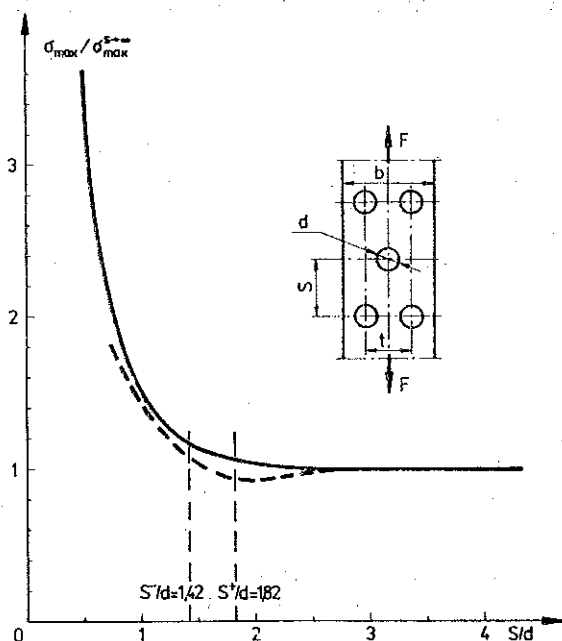
(*) Praca wykonana w ramach problemu węzłowego 05.12 — „Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji maszynowych i budowlanych”. koordynowanego przez IPPT PAN.

wcześniej rozwiązań wyznaczyć optymalny, ze względu na nośność graniczną, poszukiwany wymiar S . Przy projektowaniu szczególnie przydatna jest metoda statycznie dopuszczalnych pól naprężeń dająca górne, a więc bezpieczne, oszacowanie charakterystycznych wymiarów elementu. Kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia dają dolną ocenę wymiarów i należy je traktować jako uzupełnienie pozwalające na określenie przedziału, w którym znajduje się poszukiwana optymalna wartość. Dla pasma przedstawionego na rys. 2 dolna ocena, wynikająca z kinematycznie dopuszczalnego mechanizmu zniszczenia, wynosi $S^- = 17,2$ mm, a górna ocena, wynikająca ze statycznie dopuszczalnego pola naprężenia przy przyjęciu warunku plastyczności Hubera-Misesa wynosi $S^+ = 21,9$ mm. Optymalna odległość S między rzędami otworów zawarta jest w przedziale $17,2 \leq S \leq 21,9$ [mm].

Wyniki badań doświadczalnych przy statycznym obciążeniu pasma z pięcioma otworami, zamieszczone w pracy [4], potwierdzają teoretyczną ocenę wymiaru optymalnego. Rezultaty te, otrzymane dla próbek wykonanych ze stopu aluminium PA3 z blachy o grubości 3 mm, pokazują, że zmniejszenie odległości S poniżej wymiaru teoretycznego powoduje obniżenie statycznej wytrzymałości elementu. Dla wartości S większych od wymiaru teoretycznego wytrzymałość nie ulega już zmianie, natomiast powiększa się długość elementu, a więc i jego ciężar.

Z praktycznego punktu widzenia, ważnym czynnikiem jest wytrzymałość zmęczeniowa, ponieważ bardzo często elementy tego typu stanowiące część połączenia śrubowego czy nitowego narażone są na działanie obciążeń zmiennych. Istotny wpływ na trwałość zmęczeniową będzie miał tu stopień koncentracji naprężeń. Wykorzystując zamieszczone w pracy R. PETERSONA [5] nomogramy określono (w zależności od wymiaru S rozstawienia otworów) stosunek maksymalnych naprężeń σ_{\max} występujących przy rozciąganiu pasma o danej wartości S do maksymalnych naprężeń σ_{\max}^{∞} pasma bardzo długiego, gdy wymiar S dąży do nieskończoności. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci ciągłej linii na rys. 1. Maksymalne naprężenia gwałtownie wzrastają przy zmniejszaniu odległości S poniżej pewnej wartości. Dla większych stosunków S/d począwszy od $S/d \approx 2$ widać, że zwiększenie odległości między otworami nie obniża już maksymalnych naprężeń. Za optymalną odległość S możemy uznać taki najmniejszy wymiar, dla którego nie występuje jeszcze gwałtowny wzrost maksymalnych naprężeń. Z przebiegu teoretycznej krzywej (rys. 1) widać, że zaznaczone liniami przerywanymi górna i dolna ocena tego wymiaru bardzo dobrze wyznaczają optymalną wartość. Jeszcze bardziej przekonujące są wyniki badań elastooptycznych, które pokazano linią przerywaną na rys. 1. Doświadczalnie określona zależność przebiegu stosunku naprężeń maksymalnych od stosunku S/d zaczerpnięta z pracy [4] wykazuje wyraźne minimum dla wartości S/d bliskiej górnej ocenie teoretycznej, wyznaczonej ze statycznie dopuszczalnego pola naprężeń. Wyniki obliczeń koncentracji naprężenia, oparte na teorii sprężystości, i zgodne z nimi wyniki, otrzymane z pomiarów maksymalnych naprężeń występujących przy rozciąganiu stałą siłą modeli elastooptycznych o różnym rozstawieniu S między otworami wskazują, że również ze względu na długotrwałe obciążenia cykliczne element zaprojektowany na podstawie statycznie dopuszczalnych pól naprężeń powinien wykazywać własności zbliżone do optymalnych.

Celem badań doświadczalnych przedstawionych w niniejszej pracy jest sprawdzenie wpływu odległości S rozstawienia otworów na wytrzymałość zmęczeniową pasma osłabionego pięcioma otworami. Wyznaczony z doświadczeń optymalny



Rys. 1. Wpływ odległości S między rzędami otworów na naprężenia maksymalne rozciągniętego pasma. Linia ciągła — obliczenia wg. teorii sprężystości [5], gruba linia przerywana — pomiary elastoptyczne [4]. Cienkimi liniami przerywanymi zaznaczono teoretyczne oceny wymiaru optymalnego

wymiar S będzie porównany z wartościami określonymi metodami teorii plastyczności.

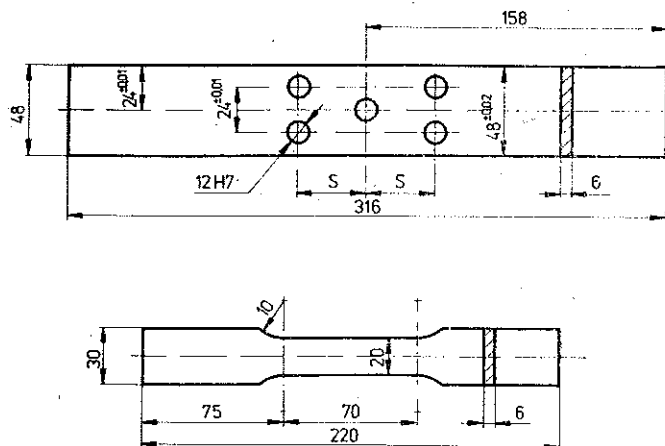
Przedstawiono najpierw wyniki badań statycznych celem sprawdzenia zgodności z rozwiązaniami teoretycznymi zachowania się próbek wykonanych ze stopu aluminium PA2, wykorzystywanego w całej pracy.

Badania zmęczeniowe podzielono na dwie części. W pierwszej z nich próbki obciążano cyklicznie utrzymując zerową wartość minimalnej siły w każdym cyklu. W drugiej części utrzymywano stałe średnie naprężenia w cyklu dla wszystkich badanych próbek.

2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Próbki wykonano ze stopu aluminium PA2, z trzech arkuszy blachy o grubości 6 mm oznaczonych kolejnymi literami A , B , C . Kształt i wymiary próbek pokazano na rys. 2. Wszystkie próbki wycinano zgodnie z kierunkiem walcowania odrzucając pasma o szerokości 100 mm z obrzeży arkusza. Po dwie próbki z każdego arkusza, o kształcie przedstawionym na rys. 2b, przeznaczono na określenie statycznej cha-

rakterystyki materiału przy rozciąganiu. Zasadnicze próbki w kształcie pasma z pięcioma otworami (rys. 2a) wykonano w ilości po 30 sztuk dla każdej z ośmiu serii różniących się wymiarem S , który wynosił 8, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 50 mm. Pozostałe wymiary były identyczne dla wszystkich próbek. Otwory wykonywano



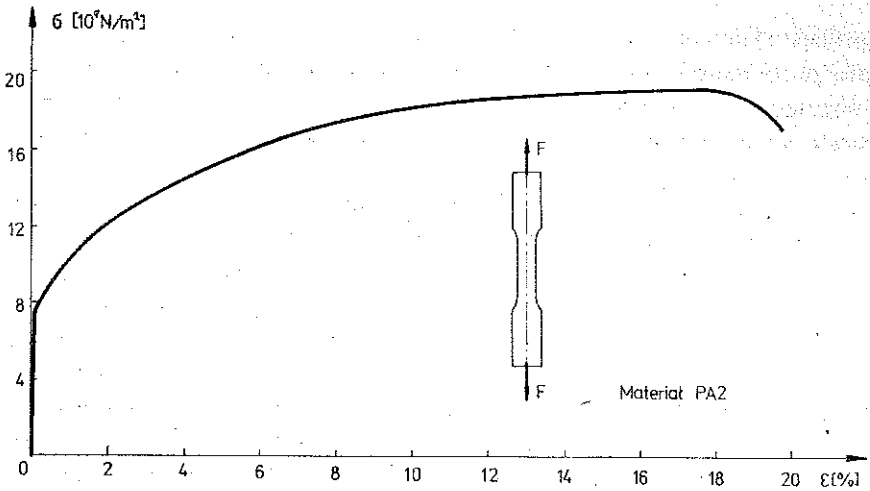
Rys. 2. Kształt i wymiary próbek z otworami (a) i do wyznaczania charakterystyki materiałowej przy rozciąganiu (b)

rozwiertakiem zwracając szczególną uwagę na ich symetryczne rozstawienie względem pasma i otworu środkowego. Boczne powierzchnie próbek frezowano z zachowaniem szóstej klasy gładkości.

Na badania statyczne przeznaczono po dwie próbki z każdej serii różniące się wymiarem S ; resztę przeznaczono na badania zmęczenia.

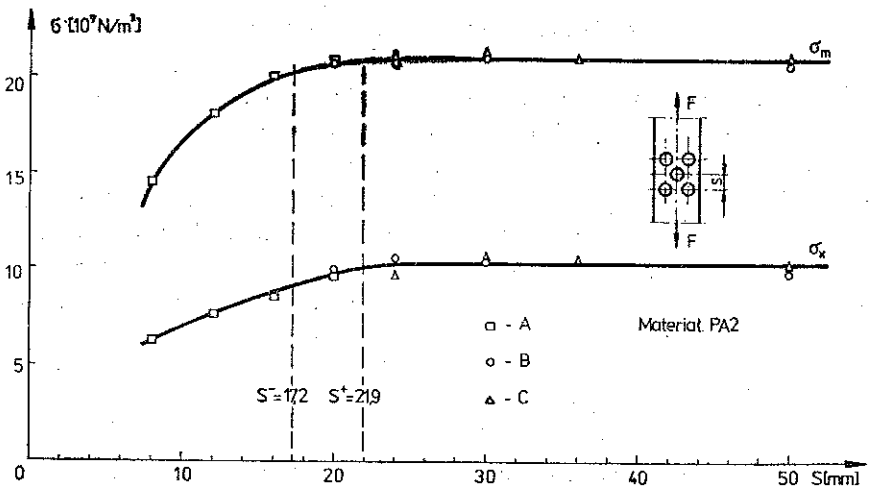
3. WYNIKI BADAŃ STATYCZNYCH

Celem określenia charakterystyki materiałowej przygotowano z każdego arkusza po dwie próbki o kształcie pokazanym na rys. 2b i rozciągnięto je ze stałą prędkością ruchu trawersy równą $v_t = 0,5$ mm/min na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej INSTRON, typ 1251. Próbki mocowane były w płaskich szczękach hydraulicznych uchwytów maszyny. Zmiany siły jako funkcji wydłużenia próbki zapisywane były na rejestratorze $X-Y$ w trakcie trwania doświadczenia. Dla wszystkich sześciu próbek otrzymano bardzo dobrą powtarzalność rezultatów. Rozrzuty wyników doświadczeń były niewielkie i wynosiły 3,6% i 1,2% odpowiednio dla granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. Średnie wartości tych wielkości wynosiły $R_e = 77,99 \cdot 10^6$ N/m² i $R_m = 191,69 \cdot 10^6$ N/m². Granica plastyczności uwidaczniała się w tym przypadku jako wyraźne załamanie na wykresie siły jako funkcji wydłużenia próbki. Wyniki badań w postaci wykresu materiałowego naprężeń nominalnych jako funkcji odkształceń inżynierskich pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Napężenie nominalne jako funkcja odkształceń inżynierskich otrzymana dla wykorzystanego w pracy materiału z próby rozciągania

Wyniki statycznego rozciągania próbek z pięcioma otworami o różnym rozstawieniu S przedstawiono na rys. 4. Rozciągając kolejne próbki rejestrowano siłę jako funkcję wydłużenia. Za umowną siłę uplastycznienia przyjmowano taką wartość, dla której moduł styczny wykresu «siła-wydłużenie» wynosił 25% początkowego



Rys. 4. Umowne napężenia graniczne σ_x i wytrzymałość na rozciąganie σ_m , otrzymane z badań statycznych, w zależności od odległości S między rzędami otworów. Liniami przerywanymi zaznaczono teoretyczne oceny wymiaru optymalnego

modułu w sprężystym zakresie. Określona w ten sposób siła odnoszona do początkowego przekroju próbki w miejscu jej osłabienia dwoma otworami. Tak zdefiniowane umowne napężenia graniczne dla próbek o różnych wymiarach S zaznaczono punktami i opisano linią ciągłą oznaczoną przez σ_x na wykresie (rys. 4). Punkty otrzymane

dla próbek wykonanych z różnych arkuszy zaznaczono w odmienny sposób, stosując w całej pracy jednakową umowę. Kwadratami oznaczono próbki wycięte z arkusza *A*, kółeczkami z arkusza *B* i trójkątami z arkusza *C*. Ułożenie punktów jest regularne i nie wykazuje dużych rozrzutów. W miarę zwiększania *S*, począwszy od wartości $S=8$ mm, wytrzymałość próbek ulega zwiększeniu do wartości $\sigma_x=103 \cdot 10^6$ N/m², którą osiąga się dla $S=23$ mm. Dalsze zwiększanie *S* nie powoduje już wzrostu nośności elementu. Optymalny wymiar określony doświadczalnie leży bardzo blisko górnej oceny S^+ wyznaczonej ze statycznie dopuszczalnego pola naprężeń.

Zaznaczone na rys. 4 punkty doświadczalne i opisująca je krzywa oznaczona symbolem σ_m odnoszą się do maksymalnych naprężeń nominalnych, które przenosiły poszczególne próbki, określonych w tym samym przekroju co naprężenia σ_x . Jak we wszystkich tego typu badaniach również i w tym przypadku przebieg zależności naprężeń maksymalnych jako funkcji wymiaru *S* jest analogiczny do zależności umownych naprężeń granicznych. Teoretyczna ocena S^+ jest również bardzo dobrą oceną wymiaru optymalnego ze względu na wytrzymałość elementu na rozciąganie.

Przeprowadzone badania potwierdzają dla tego materiału poprawność teoretycznej oceny wymiaru rozstawienia otworów rozpatrywanego elementu.

Mimo że próbki wykonano z kilku arkuszy blachy, nie zauważono różnic w ich zachowaniu ani przy określaniu własności materiałowych przy rozciąganiu próbek gładkich, ani przy badaniu pasm z otworami.

4. WYNIKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

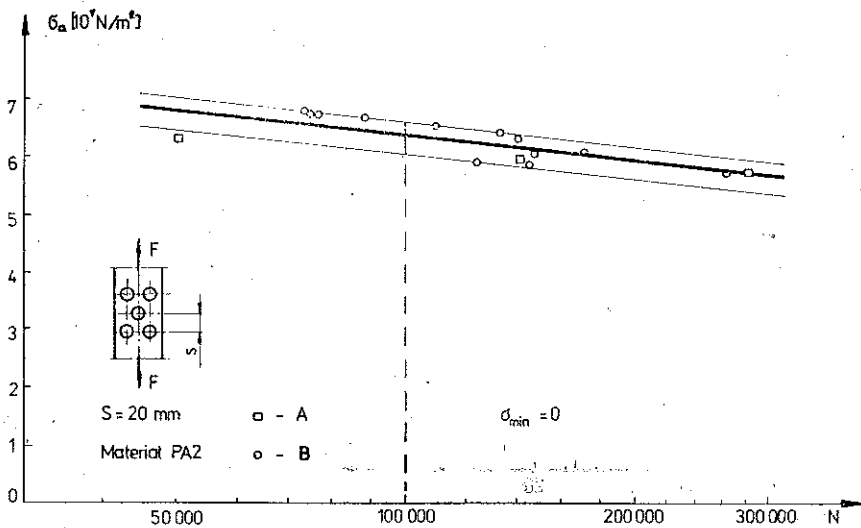
Badania zmęczeniowe przeprowadzono na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 1251. Próbki mocowano w płaskich szczękach hydraulicznych uchwytów maszyny i obciążano je tętniącymi, sinusoidalnymi cyklami obciążenia z częstotliwością $f=80$ Hz. Automatyczny układ sterujący utrzymywał stałe amplitudy i średnie naprężenia w trakcie trwania obciążenia. Dla kontroli maksymalne i minimalne siły w cyklu zapisywano jako funkcje czasu na taśmie rejestratora.

W pierwszej części badań utrzymywano zerowe siły minimalne w cyklu dla wszystkich próbek. Naprężenia średnie miały tę samą wartość, co amplituda naprężenia i dla różnych próbek były inne w zależności od przyłożonego obciążenia cyklicznego. Zdając sobie sprawę z wpływu średnich naprężeń na wytrzymałość zmęczeniową (wpływ ten może się inaczej objawiać dla próbek o różnym rozstawieniu *S* między otworami), wykonano również drugą część badań. Utrzymywano w niej stałą, rozciągającą wartość naprężeń średnich dla wszystkich próbek. Naprężenia ustalano na podstawie wyników badań pierwszej części.

W obu częściach badań dla wszystkich serii największe naprężenie w cyklu było większe od pokazanych na rys. 4 umownych naprężeń granicznych σ_x odpowiadających danej serii próbek. Znaczy to, że począwszy od pierwszego cyklu obciążenia występowały w próbce odkształcenia plastyczne, a utrzymywanie stałego obciążenia maksymalnego i minimalnego było możliwe dzięki automatycznej regulacji układu sterującego maszyny.

Dla wszystkich serii wyznaczono ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową przy przyjęciu za podstawę $N_G = 10^5$ cykli zmian obciążenia. Wyniki badań dla poszczególnych próbek danej serii przedstawiono na wykresach Wöhlera. Na osi rzędnych odkładano amplitudę naprężenia nominalnego odniesionego do minimalnego przekroju próbki osłabionego dwoma otworami. Na osi odciętych odkładano w skali logarytmicznej liczbę cykli do zniszczenia.

Dla punktów doświadczalnych danej serii określano następnie, metodą najmniejszych kwadratów, najlepiej pasującą linię prostą, przy pomocy której wyznaczono wartość amplitudy naprężenia odpowiadającą ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej dla 10^5 cykli zmian obciążenia. Z wykresów Wöhlera wyznaczano również rozrzut punktów doświadczalnych rysując, przez skrajne punkty z ominięciem najbardziej odległego, linie równoległe do linii średniej.

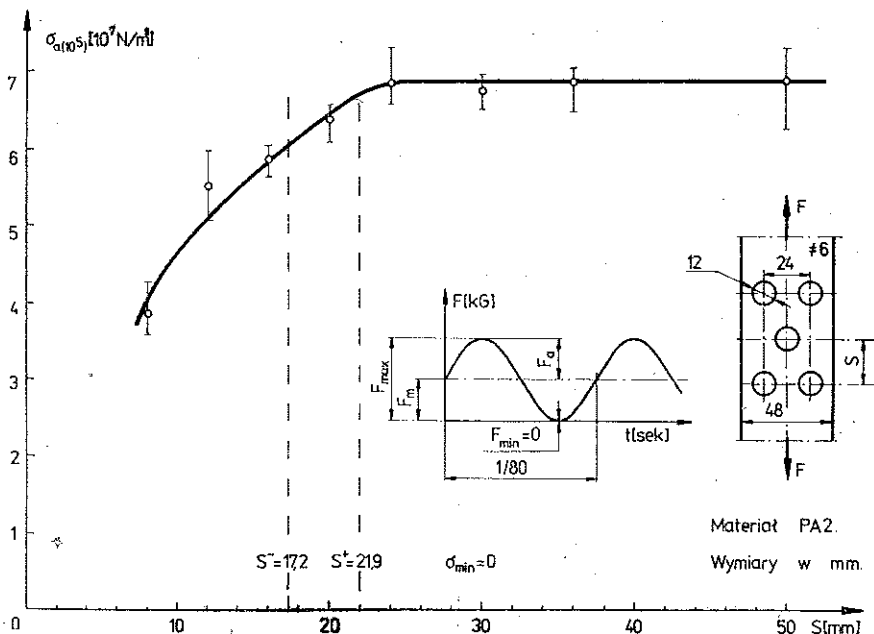


Rys. 5. Wykres Wöhlera dla próbek o odległości $S=20 \text{ mm}$, poddanych tętającemu rozciąganiu z utrzymywaniem zerowych naprężeń minimalnych w cyklu

Szczegółowe wyniki doświadczeń zamieszczono w pracy [6], tutaj jedynie dla ilustracji pokazano typowy wykres Wöhlera dla serii 15 próbek o rozstawieniu między otworami $S=20 \text{ mm}$ (rys. 5). Wykres ten reprezentuje wyniki I części badań, w której utrzymywano zerową wartość minimalnej siły w cyklu. Próbki wykonane były w tym przypadku z dwóch arkuszy blachy oznaczonych literą A i B. Zniszczenie poszczególnych próbek obciążonych z różną amplitudą naprężenia następowało w przedziale od 50 200 do 282 600 cykli. Dla punktów doświadczalnych obliczano średni przebieg poszukiwanej zależności liczby cykli do zniszczenia od amplitudy naprężenia, skąd następnie wyznaczano wartość amplitudy naprężenia odpowiadającą ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej dla 100 000 cykli. Dla serii próbek, których wyniki badań przedstawiono na rys. 5 ta poszukiwana wartość amplitudy naprężenia wynosi $\sigma_{a(10^5)} = 63,76 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Ograniczając cienkimi liniami pro-

stymi rozrzut punktów doświadczalnych możemy określić dokładność jej wyznaczenia, która w tym przypadku zawarta jest w przedziale od 3,2% do -4,6%.

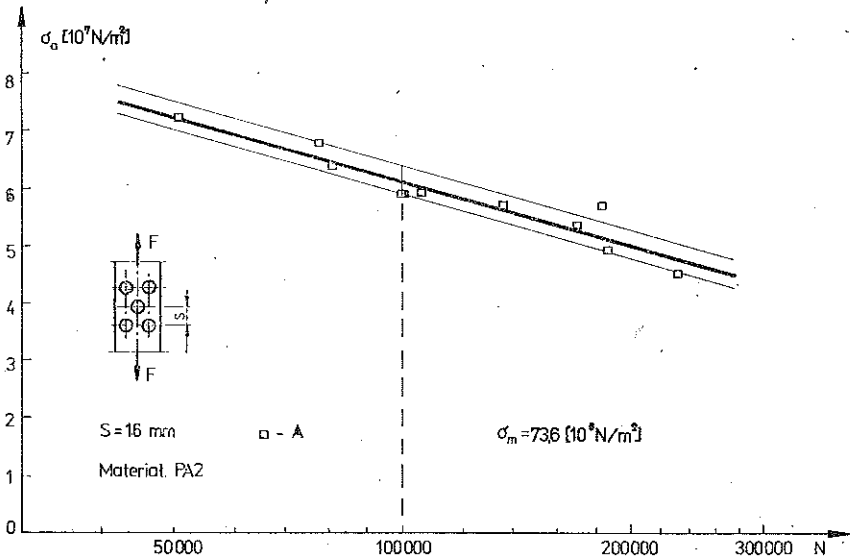
W pierwszej części badań obciążano, utrzymując zerową wartość minimalnej siły w cyklu, 114 próbek z ośmiu serii różniących się wymiarem S . Rozrzuty wyników doświadczalnych określone w opisany poprzednio sposób nie przekraczały 17,8% otrzymanych dla I serii próbek i nie były mniejsze od 7% otrzymanych dla VI serii $S=30$ mm. Rozrzuty w poszczególnych seriach przedstawiono w postaci cienkich pionowych kresek na rys. 6, gdzie przedstawiono zbiorcze wyniki tej części badań.



Rys. 6. Zależność amplitudy naprężenia odpowiadającej ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej dla 10^5 cykli zmian obciążenia od odległości S między rzędami otworów przy tętniącym rozciąganiu z zerową minimalną siłą w cyklu. Liniami przerywanymi zaznaczono oceny teoretyczne wymiaru optymalnego

Na osi rzędnych odkładano amplitudę naprężenia odpowiadającą ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej przy podstawie 10^5 cykli zmian obciążenia. Na osi odciętych odłożono odległość S między rzędami otworów. Ułożenie zaznaczonych kółeczkami dla poszczególnych serii próbek punktów doświadczalnych cechuje wyraźna regularność tak, że przebieg ciągłej linii opisującej wpływ rozstawienia otworów na wytrzymałość zmęczeniową nie budzi wątpliwości. Dla małych odległości S jej zwiększenie powoduje wzrost wytrzymałości zmęczeniowej elementu. Po przekroczeniu pewnej wartości S wytrzymałość zmęczeniowa ustala się. Ta optymalna wartość leży w przedziale $22 \text{ mm} < S < 24 \text{ mm}$ i jest bardzo bliska górnej ocenie S^+ tego wymiaru wynikającej ze statycznie dopuszczalnego pola naprężeń, którą wraz z dolną oceną S^- zaznaczono linią przerywaną.

W drugiej części badań wszystkie próbki obciążano, utrzymując stałe średnie naprężenie nominalne odniesione do minimalnego przekroju próbki w miejscu osłabienia dwoma otworami. Na podstawie badań zmęczeniowych pierwszej części przyjęto średnie naprężenie równe $\sigma_m = 73,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, dla którego możliwe było określenie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej przy podstawie $N_G = 10^5$ cykli dla wszystkich serii próbek. W tej części badań obciążano 56 próbek z siedmiu serii dla $S=8, 12, 16, 20, 24, 30, 50 \text{ mm}$. Sposób przeprowadzenia doświadczeń i przedstawienia ich wyników był identyczny z poprzednim. W analogiczny sposób wyznaczono rozrzut punktów doświadczalnych danej serii próbek opierając się na wykresie Wöhlera wyznaczonym metodą najmniejszych kwadratów.

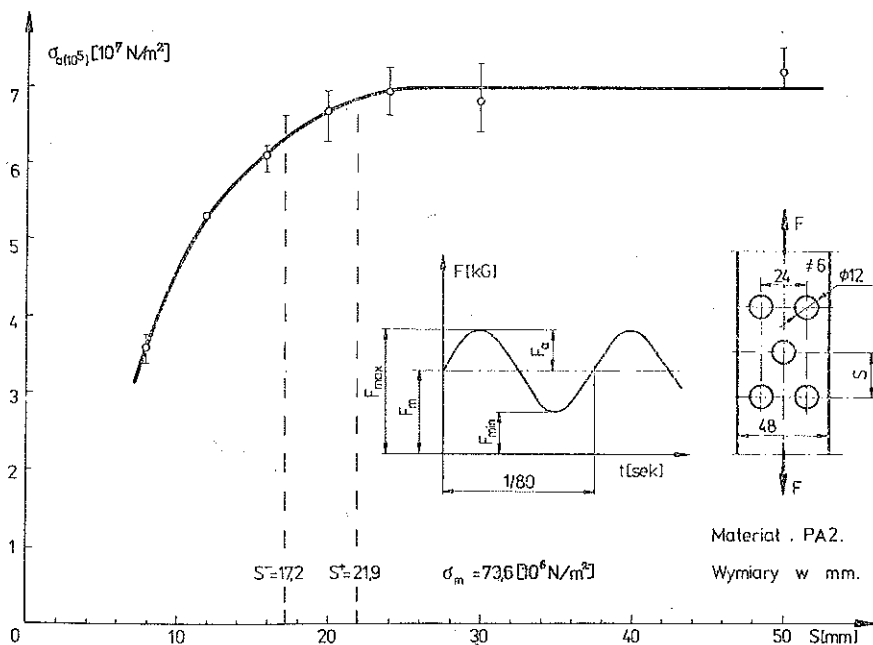


Rys. 7. Wykres Wöhlera dla próbek o odległości $S=16 \text{ mm}$, poddanych tętnięcemu rozciąganiu ze stałym średnim naprężeniem w cyklu

Na rys. 7 pokazano przykładowo wyniki III serii próbek dla $S=16 \text{ mm}$. Średni wykres trwałości od amplitudy naprężenia obliczono na podstawie wyników dla 11 próbek wykonanych z arkusza blachy A . Poszukiwana amplituda naprężenia odpowiadająca zniszczeniu przy 100 000 cykli wynosi $\sigma_{a(10^5)} = 60,9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Zaznaczone cienkimi liniami pole rozrzutu nie przekracza 8% w stosunku do $\sigma_{a(10^5)}$. Największy rozrzut w tej części badań wynosił 14,2% przy badaniu VI serii próbek o odległości $S=30 \text{ mm}$. Rozrzut najmniejszy występował w VII serii próbek dla $S=50 \text{ mm}$ i wynosił 7,1%.

Wyniki drugiej części badań zestawiono na rys. 8, przedstawiającym wpływ odległości S między rzędami otworów na ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową. Amplitudy naprężenia odpowiadające ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej dla poszczególnych serii próbek zaznaczono kółeczkami. Pionowe kreski przy każdym punkcie oznaczają jak poprzednio rozrzut wyników doświadczeń w poszcze-

gólnych seriach. Wykres ciągłej linii opisującej punkty doświadczalne jest zbliżony do wykresu z pierwszej części badań. Optymalna odległość S zdefiniowana jako najmniejsza odległość, przy której nie obserwuje się jeszcze zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej, wypada w tym samym przedziale dla $22 \text{ mm} < S < 24 \text{ mm}$. Górna ocena teoretyczna S^+ , zaznaczona linią przerywaną na wykresie (rys. 8), leży bardzo blisko wymiaru optymalnego.



Rys. 8. Zależność amplitudy naprężenia odpowiadającej ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej dla 10^5 cykli zmian obciążenia jako funkcji odległości S między rzędami otworów przy tętniącym rozciąganiu ze stałym średnim naprężeniem w cyklu równym $\sigma_m = 73,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Liniami przerywanymi zaznaczono oceny teoretyczne wymiaru optymalnego

Ograniczona wytrzymałość zmęczeniowa przy jednakowej podstawie $N_G = 10^5$ cykli, określona jako wartość maksymalnych naprężeń, jest większa dla odpowiadających sobie próbek, przy utrzymywaniu stałej wartości średnich naprężeń równych $\sigma_m = 73,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, niż przy cyklach z zerowymi naprężeniami minimalnymi. Tak więc w pierwszej części badań ($\sigma_{\min} = 0$) otrzymano $Z_0 = 76,9 \cdot 10^6$ i $Z_0 = 137,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ odpowiednio dla próbek o rozstawieniu otworów $S = 8 \text{ mm}$ i $S > 24 \text{ mm}$. Natomiast w drugiej części badań ($\sigma_m = 73,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$) otrzymano $Z_0 = 109,6 \cdot 10^6$ i $Z_0 = 143,2 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ odpowiednio dla $S = 8$ i $S > 24 \text{ mm}$. Liczby te wskazują, czego zresztą należało się spodziewać, że wpływ średniego naprężenia w cyklu na wytrzymałość zmęczeniową jest różny w zależności od rozstawienia otworów. Jednak te ilościowe różnice nie mają wpływu na doświadczalnie wyznaczony optymalny wymiar S , który był jednakowy w obu częściach badań.

5. WNIOSKI

Z badań statycznych przy rozciąganiu pasma ze stopu aluminium PA2, osłabionego pięcioma otworami wyznaczono optymalne rozstawienie między rzędami otworów przy zachowaniu niezmiennych pozostałych wymiarów elementu. Ta optymalna wartość leży bardzo blisko oceny teoretycznej, wynikającej ze statycznie dopuszczalnego pola naprężenia.

Z przeprowadzonych badań zmęczeniowych przy obciążaniu próbek tętniącymi cyklami, w których utrzymywano zerowe minimalne obciążenie, jak i dla stałych naprężeń średnich w cyklu, wyznaczono takie same optymalne rozstawienia między rzędami otworów, które zgadzały się z teoretyczną, górną oceną tego wymiaru. Badania te potwierdziły wniosek wynikający z analizy spiętrzenia naprężeń w zależności od wymiaru S , że rozpatrywany element zaprojektowany na podstawie statycznie dopuszczalnego pola naprężenia, w którego obszarach żądamy spełnienia warunku plastyczności przez panujący w nich stan naprężenia, jest również optymalny ze względu na długotrwałe obciążenia cykliczne.

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych razem z wynikami wcześniejszych prac [4, 7 i 8] upoważniają do traktowania metod teorii plastyczności, a w szczególności bardzo prostej metody statycznie dopuszczalnych pól naprężeń, nie tylko jako narzędzia do projektowania na nośność graniczną elementów obciążonych statycznie, ale jako sposób wyznaczania charakterystycznych wymiarów elementów maszyn o złożonych kształtach narażonych na obciążenia zmęczeniowe, czy udarowe.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. W. G. BRADY, D. C. DRUCKER, *An experimental investigation and limit analysis of net area in tension*, Proc. Amer. Soc. of Civ. Eng., 79, 1953.
2. W. FLÜGGE, *Handbook of engineering mechanics*, chap. 49, McGraw-Hill Book, 1963.
4. F. A. GAYDON, A. W. McCRUM, *A theoretical investigation of the yield point loading of a square plate with a central hole*, J. Mech. Physics of Solids, 2, 1954.
4. W. SZCZEPIŃSKI, *Projektowanie elementów maszyn metodą nośności granicznej*, PWN, Warszawa 1968.
5. R. E. PETERSON, *Stress concentration design factors*, John Wiley and Sons Inc., New York 1953.
6. L. DIETRICH, *Badania zmęczeniowe pasm z otworami*, Prace IPPT, 54/1976.
7. L. DIETRICH, J. MŁASTOWSKI, *Doświadczalne badania nośności granicznej połączeń sworzniowych*, Arch. Bud. Maszyn, 4, 1971.
8. L. DIETRICH, *Ocena przydatności metod teorii plastyczności do projektowania elementów maszyn na podstawie badań zmęczeniowych połączeń sworzniowych*, Prace IPPT, 38, 1976.

Резюме

ПЛАСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЯМИ

В работе представлены результаты статических и усталостных исследований при растяжении полосы с пятью отверстиями. Определено влияние расстояния между рядами отверстий на ограниченную прочность при 10^5 циклах для двух программ нагружений. В пер-

вой программе получено нулевое значение минимальной силы в цикле во второй — постоянное значение среднего напряжения для всех образцов. Определенное из экспериментов оптимальное расстояние между рядами отверстий сравнено с его теоретическими оценками, вычисленными на основе кинематически допустимого механизма разрушения и статически допустимого поля напряжений.

SUMMARY

PLASTIC DESIGN AND FATIGUE STRENGTH OF STRIP WITH HOLES

In the paper results of static and fatigue tests of tension strip with five holes are presented. Influence of a distance between rows of holes on the fatigue strength at 10^5 cycles is determined for two programs of loading. In the first one the zero value of minimum load in a cycle was kept, in the second one value of mean stress was constant for all specimens. The optimum distance between rows of holes determined from experiments was compared with the theoretical estimates of the distance calculated by means of kinematically admissible collapse mechanism and statically admissible stress field.

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 30 listopada 1976 r.
