

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

MECHANIKA

**Z. 59
GLIWICE
1977**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 511

JAN PILARCZYK

**MECHANIZM INICJOWANIA I ROZPRZESTRZENIANIA
PĘKNIĘĆ LAMELARNYCH**

G L I W I C E

1 9 7 7

Opiniodawcy:

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Myśliwiec
Prof. mgr inż. Stanisław Przegaliński

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Jan Darlewski

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 80+156 Ark. wyd. 5,6 Ark. druk. 5,4 Papier offsetowy kl. III 70x100, 70 g
Oddano do druku 19.2.1977 Odpis. do druku 28.03.1977 Druk zakończ. w kwietniu 1977
Zam 254/77 Cena zł 14,-

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

	Str.
1. WSTĘP	5
2. PRZEDSTAWIENIE ZJAWISKA	7
3. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE POWSTAWANIE PĘKNIĘĆ LAMELARNYCH	8
3.1. Ukształtowanie złącza spawanego	8
3.2. Czynniki związane z procesem spawania	8
3.3. Własności spawanej stali	9
3.3.1. Skład chemiczny	9
3.3.2. Walcowanie i obróbka cieplna	10
4. OCENA SKŁONNOŚCI STALI DO PĘKANIA LAMELARNEGO	12
4.1. Kontrola nieniszcząca blach	12
4.2. Badania metalograficzne	12
4.3. Próby złączy spawanych	12
4.4. Próby mechaniczne w kierunku grubości	13
5. MECHANIZM PĘKANIA LAMELARNEGO	14
6. CEL I ZAKRES BADAŃ	17
7. MATERIAŁY DO BADAŃ	18
8. BADANIA METODĄ FILMOWANIA	19
8.1. Dobór próby	19
8.2. Przygotowanie próbek	19
8.3. Stanowisko badawcze	20
8.4. Przebieg i wyniki badań	22
9. BADANIA METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ	24
9.1. Dobór próby i próbek	24
9.2. Stanowisko badawcze	24
9.3. Przebieg i wyniki badań	26
10. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI	28
10.1. Zakres badań	28
10.2. Analiza warunków badań	28
10.3. Analiza przyczyn zróżnicowanej skłonności badanych stali do pękania lamelarnego	28

	Str.
10.4. Omówienie wyników badań metodą filmowania	29
10.5. Omówienie wyników badań metodą emisji akustycznej	30
10.6. Przedstawienie mechanizmu inicjowania i rozprzestrzeniania pęknięć lamelarnych	31
10.7. Wnioski	32
11. LITERATURA	34
12. ZESTAWIENIE TABLIC	37
13. ZESTAWIENIE RYSUNKÓW	42
14. STRESZCZENIA	84

1. WSTĘP

W ostatnich latach zarejestrowano szereg poważnych awarii konstrukcji spawanych, przejawiających się w tworzeniu pęknięć w złączach. Elementy tych złączy stanowiły blachy walcowane, odkształcane w kierunku ich grubości w efekcie samego tylko procesu spawania lub też pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Pęknięcia te, w porównaniu ze znanymi odmianami pęknięć powstających w procesie spawania (np. gorącymi, zimnymi) lub w eksploatacji (np. zmęczeniowymi, kruchymi, korozyjnymi), posiadały charakter zupełnie odmienny. Ze względu na specyficzny - płytkowy obraz przełomów tych pęknięć nazwano je lamelarnymi.

Określenie - pękanie lamelarne - jest przyjętym w kraju odpowiednikiem angielskiego "lamellar tearing" (francuskiego - "l'arrachement lamellaire") lub stosowanych wcześniej albo równolegle angielskich: "pull - out fracture", "pull - out cracking", "fissuring along the flow structure", "decohesion cracking".

Pękanie lamelarne jest problemem nowym. Pierwszą publikację dotyczącą pęknięcia lamelnego przedstawiono w świecie w roku 1961 [1]. W kraju pierwsze przypadki pęknięć lamelarnych zarejestrowano w roku 1972 [2].

Zdarza się, że pękanie lamelarne jest niewłaściwie utożsamiane z rozwarstwianiem blach walcowanych. Tymczasem rozwarstwianie blach znane jest od bardzo dawna [3] i stanowi poważną wadę hutniczą, dyskwalifikującą w zasadzie przydatność blach na konstrukcje spawane. W wykonawstwie konstrukcji spawanych blachy z rozwarstwieniami spotykane są sporadycznie, w przypadkach niestarannej kontroli przed spawaniem blach niskiej jakości lub w przypadkach występowania w blachach zawalocowań, które pod wpływem odkształceń spawalniczych łatwo przekształcają się w rozwarstwienia. Natomiast pękanie lamelarne wiąże się z wykonawstwem złączy spawanych, przy założeniu, że walcowane elementy tych złączy nie posiadają wewnętrznych wad hutniczych w rodzaju zawalocowań lub rozwarstwień. Podstawową przyczyną powstawania pęknięć lamelarnych jest niska ciągliwość blach stalowych w kierunku ich grubości, wynikająca głównie z obecności zbyt dużej ilości wtrąceń niemetalicznych w stali.

Z punktu widzenia wykonawcy konstrukcji spawanych najprostszym sposobem ograniczenia lub wyeliminowania ryzyka powstawania pęknięć lamelarnych w konstrukcjach spawanych jest stosowanie na te konstrukcje stali czystych, pozbawionych wtrąceń niemetalicznych. Jest to jednak sposób kosztowny, a w warunkach krajowych wręcz niemożliwy do zrealizowania ze względu na ogólnie znaną niską czystość wszystkich stali konstrukcyjnych

produkowanych w kraju. Pozostaje więc sposób znacznie trudniejszy: stosowanie takich rozwiązań konstrukcyjnych i takich technologii spawania, które umożliwiłyby wykonywanie złączy spawanych bez pęknięć mimo skłonności do pęknięcia lamelarnego wykorzystywanych na te konstrukcje stali.

W warunkach krajowych jest to obecnie sposób jedyny, ponieważ poprawa czystości stali w hutnictwie jest sprawą długotrwałą, zaś konstrukcje spawane są i muszą być produkowane w dużych ilościach z uwzględnieniem ciągle wzrastających potrzeb krajowych i eksportowych. Dla zagwarantowania powodzenia przedstawionemu sposobowi konieczna jest przede wszystkim dokładna znajomość całości zagadnienia pęknięcia lamelarnego, na którą składają się: skłonność produkowanych gatunków stali do pęknięcia lamelarnego, wpływ różnych czynników na przebieg zjawiska pęknięcia, mechanizm pęknięcia lamelarnego itp. Niektóre z tych problemów były już badane [2], [4], [5], [6], [7]. Nie zajmowano się natomiast mechanizmem tworzenia pęknięć lamelarnych. Biorąc dodatkowo pod uwagę skromną literaturę światową w tym zakresie, problemowi temu poświęcono niniejszą pracę.

2. PRZEDSTAWIENIE ZJAWISKA

Pękanie lamelarne jest konsekwencją odkształcania blach stalowych w kierunku ich grubości, charakteryzujących się niską ciągliwością w tym właśnie kierunku. Odkształcanie tego rodzaju występuje prawie wyłącznie w złączach spawanych (rys. 1) w trakcie procesu spawania pod wpływem samego tylko skurozu spawalniczego lub też po zakończeniu procesu spawania pod wpływem skurozu spawalniczego i przyłożonych obciążeń zewnętrznych. Zdarza się, że odkształcenie wywołujące pękanie lamelarne jest wynikiem ewentualnej obróbki cieplnej złączy po spawaniu.

Pęknięcia lamelarne, występujące w obszarze złącza spawanego, biegną w materiale rodzimym (rys. 2) lub w strefie wpływu ciepła (rys. 3). Pęknięcia te mieszczą się w obrębie blachy i tylko wyjątkowo dochodzą do jej powierzchni. Posiadają one charakterystyczny przebieg schodkowy (rys. 4), (rys. 5) płaszczyzny pęknięć równoległe do powierzchni blachy (tarasy) są łączone przejściami (uskokami) mniej więcej do nich prostopadłymi. Przełomy pęknięć mają charakter włóknisty, typowy dla rozszczeplonego wzdłużnie drewna.

3. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE POWSTAWANIE PĘKNIĘĆ LAMELARNYCH

3.1. Ukształtowanie złącza spawanego

Sposób ukształtowania złącza spawanego posiada podstawowe znaczenie z punktu widzenia powstawania pęknięć lamelarnych. Pęknięcia lamelarne występują zwykle w złączach spawanych charakteryzujących się znacznym stopniem utwierdzenia, w których blacha skłonna do pęknięcia ulega odkształcaniu w kierunku prostopadłym do jej powierzchni. Typowymi złączami, w których pęknięcia lamelarne powstają, są złącza teowe i krzyżowe, z jedno- lub dwustronnymi spoinami czołowymi lub spoinami pachwinowymi. Złącza krzyżowe uważane są za ostrzejsze od teowych, ponieważ utwierdzenie środka w obszarze występowania spoin jest całkowite. Z kolei, dwustronne spoiny czołowe są korzystniejsze z punktu widzenia uniknięcia pęknięć lamelarnych od jednostronnych spoin pachwinowych dużych wymiarów. Pęknięcia lamelarne występują również w złączach doczołowych, w narożach przekrojów skrzynkowych (wtedy pęknięcia dochodzą zwykle do brzegu blachy i są łatwo widoczne) oraz rzadziej - w złączach doczołowych o dużym kącie ukosowania, wpływającym na powstawanie znacznych odkształceń pod wpływem skurcozu w kierunku grubości blachy.

Decydujący wpływ na powstawanie pęknięć lamelarnych w obszarze złączy spawanych posiada umiejscowienie tych złączy w konstrukcji stalowej. Prawdopodobieństwo powstawania pęknięć jest największe w tych węzłach konstrukcyjnych, które charakteryzują się wysoką sztywnością i znacznym stopniem utwierdzenia.

3.2. Czynniki związane z procesem spawania

Pęknięcia lamelarne powstają pod wpływem wszystkich stosowanych metod spawania. Najczęściej jednak pęknięcia występują w przypadkach spawania ręcznego lub półautomatycznego w osłonie gazowej.

Powstawaniu pęknięć lamelarnych w złączach spawanych sprzyjają różnice w granicach plastyczności stopiwa i materiału spawanego. W większości przypadków granica plastyczności stopiwa jest wyższa, co przy rozciąganiu złączy powoduje odkształcanie materiału spawanego w pierwszej kolejności. W związku z tym stosowanym praktycznie środkiem zmniejszającym ryzyko pęknięcia lamelarnego jest dobór spoiwa o granicy plastyczności niższej od granicy plastyczności materiału spawanego, albo też wykonanie warstwy pośredniej na zagrożonej blasze, przy użyciu spoiwa o granicy plastyczności niższej od granicy plastyczności spoiwa przeznaczonego do wykonania złącza.

Inicjatorami pęknięć lamelarnych mogą być inne pęknięcia powstające w procesie spawania (np. gorące, zimne), wady spawania a nawet pęknięcia krucho. Dwa przykłady pęknięć lamelarnych, które rozprzestrzeniły się do końca pęknięcia gorącego i kruchoego przedstawiono na rys. 6 i rys. 7.

Zmiany mocy liniowej łuku mają na ogół niewielki wpływ na powstawanie pęknięć lamelarnych. Ryzyko powstawania pęknięć zwykle wzrasta ze wzrostem liczby warstw spoiny.

3.3. Własności spawanej stali

3.3.1. S k ł a d c h e m i o z n y

Pierwsze awarie spowodowane pękaniem lamelarnym zarejestrowano w przypadkach stosowania stali uspokojonych krzemem [8], [9]. Przeprowadzona przez angielski Instytut Spawalnictwa obszerna ankietyzacja przypadków pęknięć lamelarnych wykazała jednak, że pęknięcia te występują w różnych stalach. Wszystkie aktualne publikacje podają zgodnie, że skłonność do pęknięcia lamelarnego zależy w mniejszym stopniu od gatunku i sposobu wytwarzania stali, natomiast w większym - od zawartości w stali pewnych pierwiastków. Pierwiastkami tymi są: siarka, aluminium, wodor, cyrkon oraz pierwiastki ziem rzadkich.

Siarka tworzy kruchość siarozki przyczyniające się w największym stopniu do obniżenia ciągliwości stali w kierunku grubości blachy. Aktualnie uważa się, że maksymalna zawartość siarki, gwarantująca niepowstawanie pęknięć lamelarnych, nie może przekraczać 0,015% [10], a nawet 0,010% [11]. Tytułem przykładu, wykresy zamieszczone na rys. 8 [12] oraz na rys. 9 ilustrują odpowiednio wpływ zawartości siarki na skłonność stali do pęknięcia lamelarnego oraz na wielkość przewężenia próbek pobranych i rozciąganych w kierunku zgodnym z kierunkiem grubości blachy. W przypadku rys. 8 skłonność stali do pęknięcia lamelarnego ustalono w oparciu o próbę "Cranfield" [15].

Procentowa zawartość siarki nie stanowi jednak wystarczająco dokładnego kryterium oceny jakości stali z punktu widzenia pęknięcia lamelarnego, zwłaszcza przy porównywaniu stali o różnym stopniu przeróbki plastycznej i w konsekwencji - o różnych grubościach. Stwierdzono [16], że znacznie dokładniejszym kryterium jest "rzutowana długość wtrąceń". Pojęciem tym określa się sumaryczną długość wtrąceń występujących na powierzchni jednostkowej - próbki pobranej zgodnie z kierunkiem grubości oraz kierunkiem wałocowania blachy. Przewagę tego kryterium nad kryterium procentowej zawartości siarki ilustrują dwa przykłady. W tabelicy 1 [17] zestawiono porównanie: procentowych zawartości siarki ($S\%$) i rzutowanych długości wtrąceń ($P \text{ cm/cm}^2$) oraz - odpowiadających tym wartościom - przewężeń w kierunku grubości blachy ($Z\%$), dla kilkunastu nieobrobionych cieplnie, normalizowanych lub ulepszonych cieplnie stali podwyższonej wytrzymałości. Na rys. 10 [17] przedstawiono wykres ilustrujący zależność przewężenia próbek pobranych zgodnie z kierunkiem grubości blachy oraz przewężenia próbek pobranych w kierunku poprzecznym do kierunku wałocowania blachy od rzutowanej długości wtrąceń.

Aluminium przy wyższych zawartościach tworzy wtrącenia niemetaliczne typu glinianów. Z drugiej strony [18], [19], obecność aluminium wpływa na

obniżenie zawartości tlenu w stali i zmniejszenie rozpuszczalności siarki. Nietaliozne wtrącenia siarczkowe w stali zawierającej aluminium charakteryzują się zwiększoną plastycznością, zwłaszcza w procesie walcowania stali.

Wpływ wodoru na skłonność do pęknięcia lamelarnego nie jest dokładnie zbadany. Uważa się [10], że obecność wodoru sprzyja tworzeniu się segregacji w trakcie krzepnięcia stali we wlewnicy. Uważa się również, że zawartość wodoru w stali powinna być utrzymywana poniżej 0,0003% (3 ppm) nawet, gdy zawartość siarki nie przekracza 0,015%.

Cyrkon wpływa korzystnie na kształt wtrąceń siarczkowych [20], [21]. Podobnie oddziałują pierwiastki ziem rzadkich, a zwłaszcza cer [19], [21]. Wprowadzenie do stali ceru powoduje częściowe lub całkowite zastąpienie tym pierwiastkiem manganu w siarczkach. Utrzymanie stosunku Ce/S na poziomie równym 1 lub niższym prowadzi do powstania podwójnych siarczków manganu i ceru. Utrzymanie tego stosunku na poziomie około 3 gwarantuje powstanie siarczków ceru: prostych, typu Ce_xS_y lub złożonych, typu $Ce_2O_2S_2$. Siarczki ceru przyjmują formę kulistą oraz charakteryzują się, w porównaniu z siarczkami manganu, niższą twardością i wyższą plastycznością w procesie walcowania. Korzystny wpływ ceru na odporność stali na pęknięcie lamelarne, wyrażony wielkością rzutowanej długości wtrąceń, obrazuje wykres zamieszczony na rys. 11 [17]. Wykres ten przedstawia zależność rzutowanej długości wtrąceń od grubości (stopnia przeróbki plastycznej) blachy, dla stali bez dodatku oraz z dodatkiem ceru. Pomiarzy rzutowanej długości wtrąceń zostały przeprowadzone w $\frac{1}{4}$ i w połowie grubości blachy.

3.3.2. W a l c o w a n i e i o b r ó b k a o c i e p l n a

Walcowanie blach stalowych wpływa w istotny sposób na kształt i rozmieszczenie wtrąceń niemetalicznych, decydujących o skłonności stali do pęknięcia lamelarnego. Tytułem przykładu wykres na rys. 12 [19] przedstawia wpływ stopnia przeróbki plastycznej wzdłuż głównego kierunku walcowania, na zmianę udarności w poprzek kierunku walcowania (udarność wzdłuż kierunku walcowania pozostaje stała). Wykres na rys. 13 [17] również ilustruje wpływ stopnia przeróbki plastycznej wzdłuż kierunku walcowania na zmianę udarności w kierunku poprzecznym do kierunku walcowania (wyrażoną stosunkiem niezmiennąjącej się udarności w kierunku wzdłużnym do udarności w kierunku poprzecznym), uwzględniając jednocześnie wpływ temperatury walcowania blachy. Analogiczny do tego wykresu - wykres na rys. 14 [17] uzależnia wielkości zmienne z wykresu na rys. 12 od rzutowanej długości wtrąceń.

Z punktu widzenia skłonności do pęknięcia lamelarnego korzystny wpływ wywiera podwyższenie temperatury walcowania [19], [22]. W wyższych temperaturach walcowania, powyżej 1000°C, zanika różnica pomiędzy plastycznością stali a plastycznością siarczków. Równie korzystny wpływ wywiera obniżenie stopnia zgniotu wlewków [16].

Obróbka cieplna blach stalowych po walcowaniu nie wpływa w wyraźny sposób na ich skłonność do pęknięcia lamelarnego. Wpływ taki nie został jednoznacznie ustalony ani w przypadkach wyżarzania odprężającego lub normalizowania [22], [23], ani też w przypadku wyżarzania ujednorodniającego [22], [24], [25].

Korzystny wpływ podwyższenia temperatury walcowania stali jak i niewielki wpływ obróbki cieplnej po walcowaniu, w zakresie skłonności stali do pęknięcia lamelarnego, potwierdzone zostały badaniami nad stalami krajowymi, przeprowadzonymi poza niniejszą pracą [26].

4. OCENA SKŁONNOŚCI STALI DO PĘKANIA LAMELARNEGO

W różnych laboratoriach na świecie opracowano szereg metod badawczych, mających na celu określenie skłonności stali do pęknięcia lamelarnego. Metody te można ująć w czterech grupach.

4.1. Kontrola nieniszcząca blach

Wykorzystując badania ultradźwiękowe metodą oienia w blachach walcowanych kontroluje się ilość, wielkość i rozmieszczenie wtrąceń niemetalicznych. Jak wykazuje praktyka, badania ultradźwiękowe pozwalają uzyskiwać bardzo dobre wyniki w zakresie wykrywania zawalcowań lub rozwarstwień w blachach. W zakresie wykrywania wtrąceń niemetalicznych badania te nie dają jednak zbyt dużej pewności pomimo obszernych prac prowadzonych w tym kierunku [27], [28], [29], [30]. Ostatnio zostały opublikowane rokujące nadzieje, wyniki badań ultradźwiękowych, przeprowadzonych przy użyciu specjalnych czujników ogniskujących [31]. Czujniki te pozwalają kontrolować wyodrębnione warstwy blach walcowanych, zwiększając w ten sposób precyzję w zakresie identyfikowania wtrąceń niemetalicznych.

4.2. Badania metalograficzne

Stosując ręczne lub automatyczne analizatory obrazu typu Quantimet, zlicza się ilość wtrąceń niemetalicznych na jednostce powierzchni przekroju poprzecznego blachy albo też prowadzi się pomiary procentowego udziału wtrąceń niemetalicznych w strukturze blachy stalowej, biorąc pod uwagę powierzchnię zajmowaną przez te wtrącenia lub długość tych wtrąceń. Badania metalograficzne nie pozwoliły, jak dotąd, na wytypowanie jednoznacznych kryteriów oceny skłonności stali do pęknięcia lamelarnego. Pozwoliły jednak ustalić wymienione w rozdziale 3.3.1 porównawcze kryterium "rsutowanej długości wtrąceń" [17], [28]. Kryterium to umożliwia dokonywanie dokładnych porównań skłonności do pęknięcia lamelarnego stali o różnych grubościach (różnym stopniu przeróbki plastycznej).

4.3. Próby złączy spawanych

Próby złączy spawanych polegają na wykonywaniu złączy próbnych, odtwarzających wycinki rzeczywistych węzłów konstrukcyjnych i faworyzujących powstawanie pęknięć lamelarnych. Złącza próbne, w zależności od rodzaju próby, charakteryzują się różnym stopniem utwierdzenia, zagwarantowanym odpowiednim zestawieniem elementów złączy lub użyciem przyrządu utwierdzającego. Spoiny próbne wykonuje się metodą i parametrami spawania, które mają być badane. W trakcie i po zakończeniu układania spoin próbnych kontroluje się, wykorzystując metody niszczące i nieniszczące, obecność pęknięć lamelarnych w złączach próbnych. Wyniki kontroli pęknięć stanowią kryterium prób.

Pierwszą próbą złączy spawanych była próba Cranfield opracowana przez Nicholasa [15]. Próba ta została wykorzystana do opracowania wykresu zamieszczonego na rys. 8 (rozdz. 3.3.1). Próba "otworowa" (window test) [32] została zastosowana przez Japończyków z Nippon Steel Corporation [11] do ustalenia krytycznej zawartości siarki w stali, wynoszącej 0,010%, która gwarantuje odporność stali na pękanie lamelarne. Z innych prób złączy spawanych w świecie przyjęte zostały: próba rozrywania (tear test) [32], próba krzyżowa [33], zmodyfikowana próba RRC [34], próby Thomsena [35], zmodyfikowana próba Lehigha [36], itp. Badania krajowe [37], przeprowadzone poza niniejszą pracą, wykazały dobrą przydatność do oceny skłonności stali do pękania lamelarnego, zmodyfikowanej próby Cranfield oraz próby otworowej.

4.4. Próby mechaniczne w kierunku grubości

Skłonność stali do pękania lamelarnego wiąże się ściśle z własnościami blach a w szczególności z ciągliwością blach w kierunku ich grubości. Opracowane zostały próby badania własności blach w kierunku grubości, wśród których najpopularniejszą jest próba rozciągania. Rozciąganiu poddawane są mikropróbki oraz próbki specjalne, uzyskiwane w wyniku przyspawania lub przygrzania do powierzchni blach uchwyty przedłużających i odpowiedniej obróbki mechanicznej. Mikropróbki stosowane są w przypadkach blach o grubościach ponad 25 mm, próbki specjalne - dla wszystkich grubości. W próbie rozciągania dokonuje się pomiarów przewężenia i wydłużenia. Obszerne badania doprowadziły do ustalenia wartości krytycznych przewężenia i wydłużenia, określających skłonność stali do pękania lamelarnego. Wartości te, według różnych autorów, różnią się pomiędzy sobą (tablica 2).

Czasami stosowane jest inne kryterium odporności stali na pękanie lamelarne: stosunek wytrzymałości w kierunku grubości do wytrzymałości w kierunku walcowania powinien być wyższy od 0,9 [10]. Spotykane są również zastrzeżenia dodatkowe: przewężenie powinno być funkcją średnicy próbki lub grubości blachy [41].

Innymi stosowanymi w świecie próbkami mechanicznymi w kierunku grubości oprócz próby rozciągania są: próba Brodeau [43], próba zginania płytki [44], [45], [46], próba Gerbeaux [47], próba udarności [36], próba L itd.

5. MECHANIZM PĘKANIA LAMELARNEGO

Obszerna literatura światowa, traktująca problematykę pękania lamelarnego, podaje niewiele informacji na temat mechanizmu tego zjawiska. Dostępne informacje są w zasadzie wynikiem rozważań teoretycznych, nie popartych badaniami. W dalszym ciągu tekstu przedstawiono kilka teorii mechanizmu pękania lamelarnego według różnych pozycji bibliograficznych.

W pozycji [32] wyróżnione zostały trzy etapy pękania lamelarnego: inicjowanie, rozprzestrzenianie poziome i rozprzestrzenianie pionowe.

Inicjowanie pęknięcia w złączu spawanym może odbywać się w dwojaki sposób: albo od wad spawania (takich jak żużel, brak wtopienia, porowatości w linii wtopienia) i wtedy pęknięcie wychodzi na zewnątrz złącza albo też wyłącznie od wtrąceń niemetalicznych i wtedy pęknięcie pozostaje całkowicie w obszarze materiału rodzimego. W przypadku pierwszym koncentratorem naprężeń są wady spawania, w drugim - wtrącenia niemetaliczne. W przypadku drugim (przypadek "czystego" pękania lamelarnego) autor uważa, bazując na rozważaniach nad pękaniem pod wpływem odkształcenia rozciągającego [42], że zainicjowanie pękania lamelarnego następuje wskutek oddzielenia się osnowy materiału rodzimego od wtrącenia niemetalicznego i wystąpienia naprężeń na końcach wtrącenia. Wielkość tych naprężeń wyraża się wzorem:

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{\frac{c}{2r}}$$

gdzie: σ jest naprężeniem oddziaływującym na wtrącenie niemetaliczne w odległości r od czoła pęknięcia, σ_0 jest naprężeniem oddziaływującym na złącze spawane, natomiast c jest połową długości pęknięcia. Istniejące naprężenia sprzyjają zajściu następujących etapów pękania.

Rozprzestrzenianiem poziomym nazwany został przyrost długości pęknięcia lamelarnego wynikający z łączenia się wtrąceń niemetalicznych ułożonych na jednej płaszczyźnie. Intensywność rozprzestrzeniania poziomego uzależniona jest od długości i ostrości końców wtrąceń niemetalicznych oraz od nasilenia występowania wtrąceń na jednej płaszczyźnie. Zostały zaproponowane cztery następujące schematy zachodzenia rozprzestrzeniania poziomego:

- rozprzestrzenianie pomiędzy pojedynczymi wtrąceniami dużych wymiarów, wyraźnie oddalonymi od siebie (rys. 15a).

Rozprzestrzenienie tego rodzaju może nastąpić tylko w warunkach znacznych odkształceń poprzecznych (rzędu 25%) i jest łatwiejsze w obecności małych wtrąceń kulistych usytuowanych w pobliżu wtrąceń dużych,

- rozprzestrzenianie pomiędzy licznymi wtrąceniami dużych wymiarów, ułożonymi blisko siebie (rys. 15b).

Rozprzestrzenienie tego rodzaju może nastąpić w warunkach niewielkich odkształceń poprzecznych (poniżej 5%) i jest typowe dla większości stali o znacznej skłonności do pękania lamelarnego,

- rozprzestrzenianie pomiędzy licznymi wtrąceniami niedużych wymiarów, ułożonymi blisko siebie (szczególny przypadek wtrąceń typu Al_2O_3) (rys. 15c).

Ten sposób rozprzestrzeniania jest podobny do przedstawionego dla pojedynczych wtrąceń dużych wymiarów, jednak oddzielanie się osnowy materiału od wtrąceń następuje oddzielnie dla każdego wtrącenia,

- rozprzestrzenianie pomiędzy cząstkami tego samego wtrącenia, ułożonymi blisko siebie (rys. 15d).

W przypadku tym pękanie praktycznie nie zachodzi, ponieważ osnowa pomiędzy cząstkami wtrąceń nie jest ciągła.

Rozprzestrzenianie pionowe polega na tworzeniu połączeń pomiędzy dwoma lub kilku równoległymi płaszczyznami, na których ułożone wtrącenia niemetaliczne uległy rozprzestrzenieniu poziomemu. Rozprzestrzenianie pionowe zachodzi w kierunku prostopadłym do kierunku rozprzestrzeniania poziomego, tj. w kierunku równoległym do kierunku odkształcania. Zaproponowane zostały dwa schematy rozprzestrzeniania pionowego:

- przejście pomiędzy dwoma tarasami zostaje utworzone w procesie ciągłego ścinania osnowy materiału znajdującego się pomiędzy tymi tarasami (rys. 16a),
- przejście pomiędzy dwoma tarasami tworzy szereg mikrotarasów, z których każdy zostaje zapoczątkowany wtrąceniem kulistym niewielkich rozmiarów (rys. 16b).

W pozycji [49] sugeruje się, że pęknięcie lamelarne powstaje pod wpływem oddziaływania kombinacji naprężeń normalnych do płaszczyzn ułożenia wtrąceń oraz ścinania w płaszczyznach ułożenia wtrąceń. Naprężenia normalne wynikają z odkształceń powodowanych np. skurczem spoiny. Ścinanie może zostać zapoczątkowane od grani spoiny lub od wad występujących w linii wtopienia, które spełniają rolę konoeratorów naprężeń. Autor uważa, że w przypadkach wyeliminowania koncentratorów naprężeń złącza spawane mogą być z powodzeniem wykonywane nawet ze stali o wysokiej skłonności do pęknięcia lamelarnego bez ryzyka powstania pęknięć lamelarnych. Na rys. 17 przedstawiono model tłumaczący zachodzenie zjawiska pęknięcia lamelarnego.

W pozycji [50] przeprowadzona została analiza mechanizmu pęknięcia lamelarnego w oparciu o badania z zastosowaniem próby zginania z karbem [51]. W próbie tej karb umiejscawia się (rys. 18) w taki sposób, aby przy trypunktowym zginaniu próbki inicjowanie i rozprzestrzenianie pęknięcia zachodziło w kierunku równoległym do powierzchni blachy. Prowadząc próbę zginania, autor dokonywał pomiarów odkształcenia wynikającego z otwierania się pęknięcia (wielkości COD) przy użyciu czujnika odkształceń umieszczonego w szczelinie karbu. W oparciu o wykresy ujmujące zależność wskazań czujnika odkształceń od wielkości siły zginającej (rys. 19) zostały wytypowane następujące dane charakterystyczne zjawiska pęknięcia lamelarnego:

- α - wskazanie czujnika odpowiadające osiągnięciu siły maksymalnej; wielkość ta została przyjęta za kryterium odporności na inicjowanie pęknięcia lamelarnego,
- β - wskazanie czujnika odpowiadające pierwszemu wyraźnemu spadkowi siły maksymalnej,
- η - wskazanie czujnika odpowiadające rozprzestrzenianiu się pęknięcia lamelarnego w momencie, w którym siła wywołująca pęknięcie osiąga połowę siły maksymalnej,
- $(\eta-\beta)$ - względny wskaźnik odporności na rozprzestrzenianie pęknięcia lamelarnego w poprzek pasm wtrąceń niemetalicznych,
- A - pole oalkowite pod krzywą, przedstawioną na wykresie: wielkość siły zginającej - wskazania czujnika odkształceń.

Wielkość pola przedstawia pracę zużytą na zainicjowanie i rozprzestrzenienie pęknięcia lamelarnego.

W przypadku kilku stali normalnej wytrzymałości o zróżnicowanej zawartości siarki trzy najważniejsze dane charakterystyczne pęknięcia lamelarnego: α , $(\eta-\beta)$ oraz A osiągnęły wartości zamieszczone na rys. 20. Dane te zostały określone w temperaturach $+60^{\circ}\text{C}$ i $+250^{\circ}\text{C}$. Temperatura $+250^{\circ}\text{C}$ została przyjęta w celu wyeliminowania, w niektórych przypadkach, pęknięcia łupliwego i zapewnienia pęknięcia w sposób ciągły.

W pozycji [52] wyróżnione zostały trzy okresy pęknięcia lamelarnego, okres inkubacji, okres wolnego rozrostu pęknięcia oraz okres zniszczenia.

Okres inkubacji pęknięć lamelarnych wiąże się nierozłącznie z oddziaływaniem gazów (wodoru i azotu) absorbowanych przez jeziorko płynnego metalu i przemieszczających się następnie w obszarze złącza spawanego. O ile dyfundujący gaz znajdzie się w pobliżu dużych, ostro zakończonych wtrąceń (w obszarze występowania naprężeń trójosiowych), następuje osłabienie sieci przestrzennej żelaza aż do rozpoczęcia pęknięcia łupliwego. Oddziaływanie wodoru w kierunku tworzenia pęknięć zostało zaobserwowane, a następnie określone jakościowo, nawet w przypadkach istnienia niskich naprężeń [53], [54]. Autor sugeruje, że istota osłabienia sieci przestrzennej żelaza polega na przejściu elektronów atomów wodoru na poziomy d atomów żelaza; zwiększają się wtedy odpychające siły międzymetaliczne, osłabiające stopniowo sieć przestrzenną żelaza aż do zainicjowania pęknięcia.

Powolny rozrost zainicjowanego pęknięcia zachodzi w sposób skokowy; szybkość wzrostu uzależniona jest od spójności wtrąceń niemetalicznych z metaliczną osnową oraz od szybkości gromadzenia się wodoru w okolicy początku pęknięcia. Intensywniejsze gromadzenie wodoru ma miejsce w przypadkach spoin grubych, wielowarstwowych i to tłumaczy stwierdzoną praktycznie zwiększoną skłonność do pęknięcia lamelarnego złączy spawanych ze spoinami wielowarstwowymi.

Okres zniszczenia nie jest związany z oddziaływaniem wodoru, w okresie tym ma miejsce niszczenie (rozrywanie) połączeń występujących pomiędzy pęknięciami łupliwymi, utworzonymi we wcześniejszych okresach pęknięcia.

6. CEL I ZAKRES BADAŃ

Podjęcie badań z zakresu problematyki pęknięcia lamelarnego posiada ściśle związek z sytuacją przedstawioną w rozdziale 1. Produkowane w kraju stale konstrukcyjne są skłonne do pęknięcia lamelarnego i mimo wysiłków hutnictwa w kierunku poprawy ich jakości z takim właśnie stanem rzeczy należy się liczyć obecnie i trzeba będzie się liczyć w następnych jeszcze latach. Z produkowanych stali wytwarza się konstrukcje spawane, w których nie można wyeliminować wszystkich złączy i węzłów sprzyjających tworzeniu się pęknięć lamelarnych. Przykłady awarii w trakoie spawania - kadłubów statków lub pływających wleź wiertniowych - są najlepszym tego dowodem.

Jest oczywiste, że mimo stosowania stali skłonnych do pęknięcia lamelarnego i rozwiązań konstrukcyjnych sprzyjających powstawaniu pęknięć lamelarnych, wytwarzanie konstrukcji spawanych musi gwarantować bezpieczną eksploatację tych konstrukcji. Spełnienie tego warunku może zapewnić wytypowanie, w przypadku każdego trudniejszego węzła konstrukcyjnego, specjalnych środków ostrożności do technologii spawania, zmierzających w kierunku pokonania niemożliwych do wyeliminowania trudności. Warunkiem koniecznym realizacji takiego zadania jest przede wszystkim wyczerpujące rozeznanie całości zagadnienia pęknięcia lamelarnego. W zakresie części tego zagadnienia - mechanizmu tworzenia się pęknięć lamelarnych - podjęto badania, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. Etap pierwszy, ujęty również oddzielnym sprawozdaniem [55], zrealizowany został w angielskim Institute of Technology w Cranfield przy wykorzystaniu środków i urządzeń tego Instytutu. W etapie tym do analizy mechanizmu pęknięcia lamelarnego wykorzystano niedostępną w kraju, szybkodziałającą kamerę filmową, połączoną ze specjalnym obiektywem umożliwiającym uzyskiwanie powiększeń filmowanego obrazu. Etap drugi zrealizowany został w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. W etapie tym mechanizm pęknięcia lamelarnego analizowano przy wykorzystaniu niestosowanej w kraju aparatury do badań metodą emisji akustycznej.

7. MATERIAŁY DO BADAŃ

Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu kilku krajowych i zagranicznych stali niskowęglowych podwyższonej wytrzymałości, zestawionych i scharakteryzowanych w tablicach 3 i 4. Stal angielską QT 35 zastosowano tylko w pierwszym etapie badań; stal ta pochodziła z dostaw przeznaczonych na budowane w stoczniach angielskich okręty, w których wykryto szereg przypadków pęknięć lamelarnych. Pozostałe stale (od nr 2 do nr 7) wykorzystano w drugim etapie badań. Dobór stali do drugiego etapu badań prowadzono z myślą o uzyskaniu kilku gatunków stali różniących się wyraźnie skłonnością do pęknięcia lamelarnego.

Dla stali przeznaczonych do drugiego etapu badań (od nr 2 do nr 7) przeprowadzono kontrolę rodzaju, rozkładu i wielkości wtrąceń niemetalicznych.

Analizę rodzaju wtrąceń wykonano przy zastosowaniu mikroanalizatora rentgenowskiego (produkcji japońskiej, Jeol JXA-50A). Analiza mikrorentgenowska wykazała obecność wtrąceń siarczkowych we wszystkich stalach. Przykład silnie wydłużonego wtrącenia siarczkowego ilustruje fotografia a na rys. 21. Fotografie b i c, na tym samym rysunku, przedstawiają odpowiednio rozkłady manganu i siarki. W przypadku stali nr 3 (St41U6) stwierdzono obecność nielicznych wtrąceń złożonych, w których z siarczkami manganu wystąpiły równocześnie tlenki glinu. Fotografie wtrącenia złożonego przedstawia rys. 22a. Fotografie b, o i d, na tym samym rysunku, ilustrują odpowiednio rozkłady manganu, siarki i glinu.

Pomiary ilości wtrąceń na powierzchni jednostkowej przekroju oraz średniej powierzchni wtrąceń wykonano przy użyciu analizatora obrazu Quantimet (produkcji angielskiej, Imanco Quantimet 360). Pomiary nie wykazały istotnych różnic w ilości lub sumarycznej powierzchni wtrąceń w poszczególnych stalach. Wykazały natomiast różnice w długości wtrąceń (sumarycznej długości rzutów wtrąceń). Stal 18G2VA, która okazała się bardzo skłonna do pęknięcia lamelarnego, charakteryzowała się wtrąceniami znacznej długości. Długość wtrąceń w pozostałych stalach była wyraźnie mniejsza.

8. BADANIA METODĄ FILMOWANIA

8.1. Dobór próby

Spośród dużej ilości opracowanych i stosowanych w świecie prób skłonności do tworzenia pęknięć lamelarnych do badań metodą filmowania wybrano angielską próbę "zginania płytki" (slice bend test) [45]. O doborze tej próby zdecydowały następujące jej zalety:

- próba została opracowana w tym samym angielskim Institute of Technology w Cranfield, w którym przeprowadzono badania metodą filmowania; uzyskano więc łatwo dostęp do odpowiedniego oprzyrządowania oraz doświadczeń zebranych już wcześniej przez innych badaczy [44], [45],
- próba gwarantowała uzyskiwanie pęknięć lamelarnych na powierzchni próbki, co było podstawowym warunkiem prowadzenia filmowania tych pęknięć,
- próba zapewniała uzyskiwanie pęknięć lamelarnych w każdej próbie i zawsze w obszarze, który filmowano, co było gwarancją wykorzystania każdego, kosztownego filmu,
- istniała możliwość poddania stosowanych w badaniach próbek symulowanym cyklom spawalniczym, w celu odtworzenia w tych próbkach struktur występujących w rzeczywistych strefach wpływu ciepła,
- oprzyrządowanie do prowadzenia próby oraz wykonawstwo próbek były stosunkowo proste i tanie,
- próba została zalecona do stosowania, do oceny i klasyfikacji skłonności do pękania lamelarnego stali produkowanych w Anglii.

Próba "zginania płytki" [44] umożliwia odkształcanie materiału blachy walcowanej w kierunku grubości tej blachy. Istotą próby przedstawia schematycznie rys. 23, wymiary stosowanych próbek - rys. 24. Fotografia zamieszczona na rys. 25 przedstawia próbkę w trakcie próby, zamocowaną w oprzyrządowaniu pomiędzy trzpieniem zginającym, a odpowiednio ukształtowaną matrycą prasy hydraulicznej. Celem próby "zginania płytki" jest określenie krytycznej wielkości odkształcenia (ugięcia) płytki, przy którym pojawia się pierwsze pęknięcie po rozciąganej stronie płytki.

8.2. Przygotowanie próbek

Próbki do badań metodą filmowania pobrano z blachy stalowej w gatunku QT 35 w taki sposób, aby najdłuższy brzeg próbek, alternatywnie: albo pokrywał się z kierunkiem walcowania blachy (próbki "wzdłużne"), albo też - był poprzeczny do tego kierunku (próbki "poprzeczne"). Pobrane próbki obrabiono mechanicznie zgodnie z zaleceniami autorów próby "zginania płytki". Następnie próbki starannie szlifowano, dobierając odpowiednio kierunek szlifowania. Czynność ta posiadała zasadnicze znaczenie ze względu na załamywanie, uginanie i rozszczepianie w mikroskopijnych śladach szlifowania - strumienia światła oświetlającego próbkę w trakcie filmowania.

Znaczną część próbek "wzdłużnych" poddano oddziaływaniu symulowanych cykli spawalniczych w celu uzyskania w tych próbkach struktur odpowiadających strukturom występującym w strefach wpływu ciepła złączy spawanych z tej samej stali. Symulowanie przeprowadzono przy pomocy symulatora cykli cieplnych, jakim dysponuje Institute of Technology w Cranfield. Próbkę zaciśniętą w szczękach symulatora poddawano nagrzewaniu oporowemu oraz ochłodzeniu wodą. Wyprofilowanie pożądanego cyklu cieplnego odbywało się przez nastawienie zespołu zmiennych oporów i tym samym ustalenie napięcia analogowego. Regulację temperatury próbki zapewniały: tyrystor i dwa ignitrony, które oddziaływały na napięcie wejściowe transformatora zasilającego. Sprzężenie zwrotne pomiędzy elementami symulatora zapewniała termopara przygrzana do symulowanej strefy próbki i mierząca temperaturę tej strefy w każdym punkcie cyklu cieplnego. Szczęki mocujące, nagrzewające, i chłodzące symulowaną próbkę oraz transformator zasilający symulatora przedstawia rys. 26. Programator cykli cieplnych oraz rejestrator cykli symulowanych widoczne są na rys. 27.

Reeczywiste cykle spawalnicze przyjęto do badań z pracy [57], w której autor prowadził rejestrację przebiegów temperatury w spoinach wielowarstwowych (rys. 28) przy wykonywaniu złączy spawanych ze stali QT 35. Temperatury maksymalne w cyklach spawalniczych przyjętych do badań wynosiły: 1300, 750, 500 i 300°C.

W celu sprawdzenia jakości i określenia efektów operacji symulowania przeprowadzono szczegółowe badania metalograficzne, przy wykorzystaniu mikroskopii optycznej i elektronowej oraz badania twardości. Przeprowadzone badania wykazały, że:

- symulowane strefy wpływu ciepła wszystkich próbek były jednolite na całej szerokości i grubości; symulowane strefy wpływu ciepła serii próbek poddanych takiemu samemu cyklowi cieplnemu były praktycznie identyczne. Przyjęto więc, że symulowanie zostało przeprowadzone w sposób prawidłowy przy użyciu właściwie działającego urządzenia,
- struktura materiału rodzimego oraz struktury stref wpływu ciepła uzyskanych pod wpływem cykli cieplnych z temperaturami maksymalnymi 300 i 500°C nie różniły się między sobą,
- w strefach wpływu ciepła, w których temperatura maksymalna osiągnęła 750°C, nastąpiła przemiana ożądciowa,
- strefy wpływu ciepła, w których temperatura maksymalna osiągnęła 1300°C, uległy przemianie oalkowitej.

8.3. Stanowisko badawcze

Schemat ideowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 29. Silne źródło światła "6" oświetla, odbijając się w lusterku "5", dolną powierzchnię próbki "2", spoczywającej w matrycy "3". Obraz dolnej powierzchni próbki "2" jest kierowany lusterkiem "4" w stronę układu optycznego "7", kamery "8". Kamera rejestruje zmiany zachodzące na dolnej powierzchni

próbki "2" w trakcie zginania próbki (w trakcie pionowego ruchu matrycy w kierunku do nieruchomego trzpienia gnącego "1").

Fotografię stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 30. powiększona część środkową tej fotografii zamieszczono na rys. 31.

Stanowisko badawcze zmontowano w oparciu o oryginalne oprzyrządowanie do przeprowadzania prób "zginania płytki", dokonując następujących istotnych modyfikacji:

- przekonstruowane oryginalną matrycę (rys. 25), w której umieszono są i wygina badane próbki,
- zaadaptowano i połączono z matrycą szybkodziałającą kamerę filmową; do kamery dobrano obiektyw oraz zespół tubusów i pierścieni tak, aby nie tylko wyeliminować stosowane zwykle w kamerach pomniejszenie filmowanego obrazu, ale uzyskać jego powiększenie,
- dobrano zespół lusterek odpowiednio kierujących wiązkę światła i filmowany obraz oraz dostosowano do tego zespołu i do zmienionego układu optycznego kamery - układ oświetlający dużej jasności.

Zastosowana w badaniach szybkodziałająca kamera filmowa (produkcji USA, firmy Wollensak Fastax, typu WE3, serii 16777), dzięki posiadanym rozwiązaniom konstrukcyjnym, gwarantowała wysoką precyzję działania. Bardzo dobre przyspieszenie przy rozruchu oraz równomierny przesuw filmu przez cały czas działania zapewniały dwa sprzężone ze sobą silniki. Jeden z silników napędzał rolę przesuwu filmu zsynchronizowaną z wirującym pryzmatem sterującym wiązkę dochodzącego do kamery światła. Silnik drugi służył do napędu szpuli nawijającej naświetlony film. Zespół sterowania czasu umożliwiał płynną regulację szybkości wykonywania zdjęć w zakresie od 150 do 8000 klatek na sekundę przy użyciu filmu o szerokości 16 mm oraz 300 do 16000 klatek na sekundę przy użyciu filmu o szerokości 8 mm. Wirujący pryzmat, wykonany ze szkła o wysokich parametrach optycznych, gwarantował wysoką zdolność rozdzielczą oraz dobrą jakość obrazu.

Do kamery filmowej dobrano obiektyw "Super-Takumar" - 1:5,5/135 (produkcji japońskiej, firmy Asaki Opt.Co nr 1904892) oraz zespół tubusów i pierścieni w celu zastąpienia oryginalnego obiektywu kamery układem odpowiadającym teleobiektywowi. Dobrany układ optyczny umożliwiał filmowanie obszaru o powierzchni 3x4 mm przy użyciu filmu o szerokości 16 mm.

W czasie filmowania, mimo posługiwania się specjalnymi filmami wysokiej czułości, zachodziła konieczność oświetlania próbek specjalnym źródłem światła o dużej jasności. Celem lepszego wykorzystania źródła światła - strumień światła ogniskowano w obszarze filmowania. Na konieczność stosowania źródła światła o dużej jasności wpłynęły: z jednej strony - bardzo krótki czas ekspozycji, wynikający z dużej szybkości filmowania oraz z drugiej - silne tłumienie i duże straty strumienia światła, które były wynikiem kilkukrotnego odbijania strumienia światła przez lustro i powierzchnię próbki, przechodzenia strumienia światła przez nietypowy układ optyczny kamery oraz stosowania dużej przysłony w celu uzyskania du-

zej głębi ostrości, zapewniającej ostrość filmowanego obrazu powierzchni próbki przez cały okres jej zginania.

Jako źródło światła dobrano potężny reflektor z żarówką o mocy 2 kW. Bezpośrednio przed reflektorem zamocowano soczewkę skupiającą dużej średnicy w taki sposób, aby strumień światła był ogniskowany na lusterku "5" (rys. 29), wykonanym z polerowanego aluminium; lusterka szklane ulegały natychmiastowemu niszczeniu pod wpływem wysokich temperatur towarzyszących padającemu na nie strumieniowi światła.

8.4. Przebieg i wyniki badań

Zestawienie wszystkich próbek poddanych próbom zginania podano w tablicach 5 i 6. Badane próbki umieszczano kolejno w matrycy prasy hydraulicznej i dociskano do trzpienia gnącego siłą 1 kN w celu wyeliminowania wszelkich luzów. Zerowano ozujnik zegarowy (o dokładności 0,001 cala - około 0,03 mm), zastosowany do dokładnego pomiaru ugięcia próbek. Wykorzystując układ optyczny kamery i obserwując rozciągającą powierzchnię próbek, bardzo ostrożnie zwiększano nacisk trzpienia prasy hydraulicznej aż do zauważenia na wyszlifowanej powierzchni próbek pierwszego śladu utraty ciągłości materiału. Rejestrowano odpowiadające temu momentowi wartości ugięcia, wskazywane przez ozujnik (tablica 5 i 6).

Następnie, zwiększając w dalszym ciągu ugięcie próbek, filmowano zjawiska zachodzące na rozciąganej ich powierzchni. Synchronizowano przy tym czas zginania do całkowitego złamania próbki z czasem wynikającym z szybkości filmowania i długości filmu. Obydwa czasy mieściły się w granicach 2,5-3 sekund, przy szybkości filmowania około 3000 klatek na sekundę i długości filmu 30 metrów.

Wszystkie, nakręcone z dużą szybkością filmy, prześledzono dokładnie w "zwolnionym" tempie, początkowo przy użyciu normalnego projektora, a następnie systemem "klatka po klatce", przy wykorzystaniu specjalnego stanowiska pozwalającego na przewijanie i powiększanie filmów.

Spśród kilkudziesięciu wykonanych filmów wyselekcjonowano jedenaście, które przygotowano do projekcji. Opracowany zestaw filmów stanowi uzupełnienie do tekstu niniejszej pracy. Filmy zostały wyselekcjonowane w taki sposób, aby zobrazować przebieg mechanizmu powstawania pęknięć lamelarnych w strukturze materiału rodzimego oraz w strukturach występujących w strefach wpływu ciepła złączy spawanych. Z czterech filmów, odpowiadających materiałowi rodzimemu w próbkach "wzdłużnych" i w próbkach "poprzecznych" oraz strukturę powstałym pod wpływem cykli cieplnych z temperaturami maksymalnymi 500 i 1300°C, wybrano przykładowo po kilka oddzielnych klatek, które powiększono i przedstawiono na rys. 32 i rys. 33.

Pewną ilość próbek poddano próbom bardzo wolnego zginania z pominięciem filmowania. Przy zginaniu obserwowano w sposób ciągły, korzystając z układu optycznego kamery, zjawiska zachodzące na rozciąganej powierzchni

próbek. Rejestrowano momenty charakterystyczne w trakcie przebiegu tych zjawisk, odczytując równocześnie wskazania ozujnika mierzącego ugięcie próbek. Zarejestrowane uwagi i odczytane wartości zestawiono w tablicach 5 i 6. Wyniki te zreasumowano w tablicy 7 oraz na rys. 34.

9. BADANIA METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ

9.1. Dobór próby i próbek

Do badań metodą emisji akustycznej wybrano próbę ujętą wymaganiami przepisów Det Norske Veritas [4], zwaną próbą "Z". Próba ta polega na rozciąganiu materiału blachy walcowanej w kierunku grubości tej blachy. Przy wyborze próby "Z" kierowano się następującymi jej zaletami:

- próba została zaadaptowana już wcześniej w Instytucie Spawalnictwa do badań skłonności stali do pęknięcia lamelarnego [2], [4], [5]; dysponowano więc pewną ilością zebranych przy okazji tych badań doświadczeń,
- próba zapewniała uzyskiwanie pęknięć lamelarnych w każdej próbie, co dawało gwarancję celowego wykorzystania każdej, pracochłonnej w przygotowaniu próbki,
- istniała możliwość stosunkowo łatwego dołączenia do próbek ozujnika emisji akustycznej,
- istniała możliwość wykonywania pomiarów odkształceń lokalnych, związanych z inicjowaniem i rozprzestrzenianiem pęknięć lamelarnych.

Oryginalny sposób przygotowania próbek do próby "Z" przedstawiono na rys. 35. Z badanej blachy oraz dwóch pomocniczych płyt pionowych wykonuje się spawane złącze krzyżowe (a). Z gotowego złącza wycina się próbki - półfabrykaty (b), które następnie obrabia się do odpowiednich wymiarów, aby uzyskać próbki do rozciągania (d). Istotnym wymiarem próbek do rozciągania jest ich średnica D, którą przyjmuje się w zależności od grubości blachy g. Kryterium próby stanowi przewężenie "Z", które nie powinno być mniejsze niż 20%.

Oryginalną próbę "Z" w badaniach zmodyfikowano. Modyfikacja uprościła przygotowanie próbek, nie wpływając na jakość wyników próby. W ramach modyfikacji spawane złącza krzyżowe (rys. 35a) zastąpiono odpowiednią ilością złącza zgrzewanych tarciowo; każde złącze zgrzewane składało się z dwóch prętów oraz płytki wyciętej z badanej blachy o grubości tej blachy. Złącza zgrzane tarciowo obrabiano mechanicznie w celu uzyskania wymiarów przedstawionych na rys. 36, które odbiegały od wymiarów oryginalnych. Fotografię przykładowej próbki obrabianej mechanicznie, gotowej do badań oraz próbki półfabrykatu, bezpośrednio po zgrzaniu, zamieszczono na rys. 37.

9.2. Stanowisko badawcze

Schemat ideowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 38. Badana próbka "1" mocowana jest w szczękach maszyny wytrzymałościowej, która zapewnia regulowaną i stałą szybkość odkształcania próbki. Z próbką sprzężony jest ozujnik emisji akustycznej "2", który bezpośrednio połączony jest ze wzmacniaczem wstępnym "4", a następnie - z urządzeniem zasadniczym "5", odbierającym, filtrującym, wzmacniającym i przetwarzającym sygnały emisji

akustycznej oraz w dalszej kolejności z urządzeniami peryferyjnymi: drukarką "6" i rejestratorem "8". Niezależnie od czujnika emisji akustycznej "2" do próbki "1" domocowany jest precyzyjny czujnik odkształceń "3", który dokonuje pomiarów odkształceń lokalnych na odcinku próbki stanowiącym środkową część grubości blachy. Czujnik "3" połączony jest ze wzmacniaczem "7" oraz rejestratorem "8". Rejestrator "8", pracujący w układzie Y_1Y_2-X , rejestruje zarówno przebiegi sygnałów emisji akustycznej jak i przebiegi odkształceń lokalnych w funkcji czasu. Na rejestratorze "9", stanowiącym integralną część maszyny wytrzymałościowej, rejestrowane są zmiany siły obciążającej próbkę w trakcie jej odkształcania, w funkcji czasu.

Fotografię stanowiska badawczego zamieszczono na rys. 39, natomiast powiększone fragmenty tego stanowiska - na rys. 40 i rys. 41.

Stanowisko badawcze zmontowano, wykorzystując następujące urządzenia i aparaturę pomiarową:

- maszynę wytrzymałościową firmy Instron (model 1115 o obciążeniu maksymalnym 100 kN), która charakteryzuje się stałą i bardzo dokładnie regulowaną szybkością odkształcania próbek, brakiem bezwładności mechanicznej i w związku z tym niewprowadzaniem błędów do wyników badań oraz wysokiej czułości urządzeniem tensometrycznym do pomiaru sił odkształcających,
- urządzenie do badań metodą emisji akustycznej Audimat P (firmy Leonard, produkcji francuskiej), pozwalające odbierać i przetwarzać sygnały emisji akustycznej z bardzo dobrą dokładnością. Zasadniczymi elementami urządzenia są: wzmacniacz, do którego doprowadzane są sygnały od czujnika poprzez przedwzmacniacz, przełączalny filtr częstotliwości sygnałów emisji akustycznej oraz regulowany dyskryminator stanowiący podstawę analogowej obróbki sygnałów. Obróbka analogowa prowadzona jest dwoma drogami - sygnały są zliczane albo narastająco, albo zawsze od zera w dewelnie ustalonej jednostce czasu. Zliczone sygnały mogą być przekazywane w formie cyfrowej przy użyciu drukarki lub też w postaci analogowej, w układzie liniowym lub logarytmicznym, przy użyciu rejestratora,
- drukarkę IMP 21 (firmy Leonard, produkcji francuskiej), stanowiącą wyposażenie uzupełniające urządzenia do badań metodą emisji akustycznej Audimat P. Drukarka pozwala zapisywać w 21 kolumnach dane dotyczące: podstawy czasu, kolejnych numerów pomiaru oraz ilości sygnałów emisji akustycznych równocześnie w systemie narastającym i w systemie zerowania po każdym pomiarze,
- czujnik odkształceń DD1 wraz ze wzmacniaczem KWS/T-5 (firmy Hottlinger Baldwin Messtechnik GmbH, produkcji zachodniemieckiej). Zastosowany w badaniach czujnik został wybrany jako najbardziej odpowiedni, w ramach badań wstępnych, spośród kilku czujników, którymi dysponowaliśmy. Czujnik DD1 stanowi precyzyjne urządzenie do bardzo do-

kiadnego pomiaru odkształceń w zakresie $\pm 2,5$ mm. Wartość odkształcenia mechanicznego przetwarzana jest przez wbudowany w ozujnik tensometr na odpowiedni sygnał elektryczny, który podawany jest do kompensacyjnego układu mostkowego zabudowanego we wzmacniaczu, a następnie jest wzmacniany i przekazywany do zarejestrowania,

- rejestrator $Y_1 Y_2 - X$ (model 26000 A3, firmy Bryans Southern Instruments Limited, produkcji angielskiej), pozwalający na równoczesną rejestrację dwóch wielkości w funkcji trzeciej.

9.3. Przebieg i wyniki badań

Zasadniczym celem badań metodą emisji akustycznej było ilościowe ujęcie mechanizmu pęknięcia lamelarnego i tym samym uzupełnienie wyników uzyskanych w badaniach metodą filmowania. Dla zrealizowania zamierzonego celu przyjęto następujący sposób postępowania:

- próbki poddawano rozciąganiu ze stałą szybkością aż do zerwania, dokonując pomiarów R_e , R_m , Z i A ,
- w trakcie rozciągania rejestrowano:
 - sygnały emisji akustycznej wywoływane odkształcaniem sprężystym i plastycznym oraz utratą ciągłości (pękaniem) materiału. Zespół urządzeń do rejestrowania sygnałów emisji akustycznej dobrano i wyregulowano w taki sposób, aby wyeliminować wpływ szumu maszyny wytrzymałościowej. Rejestrowano tylko sygnały wysokiej częstotliwości (powyżej 100 kHz).

Założono, że przebieg sygnałów emisji akustycznej w funkcji czasu rozciągania, będzie zróżnicowany i pozwoli na wyodrębnienie poszczególnych etapów odkształcania próbek aż do ich zerwania,

- odkształcenia lokalne na odcinku próbek, stanowiącym środkową część grubości blachy.

Założono, że skoro cała próbka rozciągana jest ze stałą szybkością (na maszynie Instron), wybrany odcinek pomiarowy tej próbki będzie się odkształcał jednostajnie, o ile materiał próbki będzie jednorodny. Jeżeli jednak w materiale wystąpią niejednorodności (wtrącenia niemetaliczne leżące w płaszczyźnie prostopadłej do osi próbki i linii sił rozciągających), odkształcenia lokalne odcinka pomiarowego próbki będą niejednorodne. Zmiany wielkości odkształceń lokalnych będą sygnalizowały momenty utraty ciągłości materiału: różnice w wielkości tych zmian pozwolą odróżnić inicjowanie pęknięcia od rozprzestrzeniania pęknięcia oraz określić sposób przebiegu tych zjawisk,

- niezależnie od pomiarów dokonywanych przy pomocy aparatury dołączonej do maszyny wytrzymałościowej dodatkowo rejestrowano przebieg sił obciążających próbki w funkcji czasu, przy pomocy rejestratora stanowiącego integralną część maszyny wytrzymałościowej, w celu dokład-

nego uchwycenia granicy plastyczności i odkształcenia plastycznego stali,

- pewną ilość próbek poddano próbom rozciągania częściowego, tzn. prób rozciągania nie prowadzono do zerwania, ale przerywano je po osiągnięciu częściowego tylko odkształcenia na długości pomiarowej próbek. Próbki częściowo odkształcone przeznaczono do badań mikroskopowych, które prowadzono w taki sposób, aby zarejestrować przy dużym powiększeniu zmiany zachodzące w obszarach występowania wtrąceń niemetalicznych pod wpływem odkształcenia o różnej wielkości.

Drógą prób ustalono optymalne szybkości rozciągania próbek, które zapewniły osiągnięcie zerwania w czasie od 6 do 10 minut. Przy większych szybkościach rozciągania poszczególne etapy odkształcania próbek jak i etapy tworzenia pęknięć lamelarnych zlewały się ze sobą i w związku z tym przebiegi sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu nie wykazywały istotnych punktów charakterystycznych. Przy bardzo małych szybkościach odkształcania punkty charakterystyczne rejestrowanych przebiegów miały tendencję zanikania. Występowały również trudności techniczne, związane z rejestrowaniem bardzo długich przebiegów, przy użyciu posiadanej do dyspozycji aparatury.

Badania metodą emisji akustycznej objęły sześć gatunków stali, od nr 2 do nr 7 (wg tablicy 3). Z każdej stali wykonano od kilku do kilkunastu próbek do badań rozpoznawczych, po 15 próbek do badań zasadniczych oraz po 5 próbek do prób rozciągania częściowego. Dla każdej próbki wyliczono: R_m , Z i A oraz dla wybranych próbek - dodatkowo R_e . Dla każdej próbki uzyskano wykres przedstawiający dwa przebiegi: sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych - w funkcji czasu oraz dla wybranych próbek - dodatkowo wykres przedstawiający przebieg siły obciążającej próbkę w funkcji czasu. Ze względu na bardzo dużą ilość zebranych wyników badań dokonano ich selekcji. W tablicy 8 zestawiono wartości średnie - własności wytrzymałościowych i plastycznych badanych stali, wyliczone w oparciu o wszystkie uzyskane wyniki oraz dodatkowo - uwagi odnośnie przełomów po zerwaniu. Na rysunkach od 45 do 50 zamieszczono po jednym dla każdej stali wykresie charakterystycznym, przedstawiającym przebiegi sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu. Zamieszczone wykresy zostały przerysowane z wykresów oryginalnych z dodatkowym uwzględnieniem: dokładnych wartości liczbowych zarejestrowanych przez drukarkę sygnałów emisji akustycznej oraz wartości zarejestrowanych na rejestratorze maszyny wytrzymałościowej.

Wyniki badań mikroskopowych, uzupełniających badania metodą emisji akustycznej, ilustrują przykładowe fotografie zamieszczone na rysunkach od 51 do 66. Badania mikroskopowe przeprowadzono przy użyciu mikroskopów optycznego i skaningowego oraz przy zastosowaniu różnych warunków pobierania i przygotowania próbek do obserwacji.

10. Dyskusja wyników badań i wnioski

10.1. Zakres badań

Celem badań było ustalenie mechanizmu inicjowania i rozprzestrzeniania pęknięć lamelarnych w stalach podwyższonej wytrzymałości, charakteryzujących się zróżnicowaną skłonnością do tworzenia tego rodzaju pęknięć. Badania ujęto w dwóch etapach. W etapie pierwszym mechanizm pęknięcia lamelarnego analizowano przy wykorzystaniu metody szybkiego filmowania. W etapie drugim, przy określaniu mechanizmu pęknięcia lamelarnego, posłużono się metodą emisji akustycznej oraz w uzupełnieniu - badaniami mikroskopowymi. Całość badań nad mechanizmem powstawania pęknięć lamelarnych poszerzono o analizę przyczyn zróżnicowanej skłonności badanych stali do pęknięcia lamelarnego.

10.2. Analiza warunków badań

Badania przeprowadzono w oparciu o 7 gatunków krajowych i zagranicznych stali podwyższonej wytrzymałości. Jeden z tych gatunków wykorzystano wyłącznie w pierwszym etapie badań, pozostałe sześć zastosowano w etapie drugim. Stal do pierwszego etapu badań charakteryzowała się bardzo małą odpornością na pęknięcie lamelarne. Pozostałe stale starano się dobrać w taki sposób, aby dysponować gatunkami o wyraźnie zróżnicowanej skłonności do pęknięcia lamelarnego. Jednak po przeprowadzeniu wszystkich badań okazało się, że dobór stali został przeprowadzony tylko częściowo zgodnie z zamierzeniami. Trzy gatunki stali okazały się stalami o zbliżonej skłonności do pęknięcia lamelarnego. Specjalnie wybrane stale - szwedzka i japońska - nie wykazały oczekiwanej, szczególnie wysokiej odporności na pęknięcie lamelarne.

Składy chemiczne i własności mechaniczne wszystkich badanych stali odpowiadały wymaganiom odpowiednich norm lub przepisów.

W badaniach posłużono się dwoma próbami skłonności do tworzenia pęknięć lamelarnych, opracowanymi wcześniej przez innych badaczy i opisywanymi w literaturze fachowej: próbą zginania płytki oraz próbą "Z". Obydwie próby gruntownie zmodyfikowano w taki sposób, aby spełniły one wymagania w zakresie możliwości dokonywania obserwacji i pomiarów zjawiska pęknięcia lamelarnego, dobrej selektywności oraz łatwości realizacji.

Dobrana do badań nowoczesna aparatura badawcza zapewniała wysoką precyzyjną działania i dużą dokładność wyników badań.

10.3. Analiza przyczyn zróżnicowanej skłonności badanych stali do pęknięcia lamelarnego

Ponieważ stale zastosowane w drugim etapie badań (od nr 2 do nr 7) różniły się skłonnością do tworzenia pęknięć lamelarnych, przeprowadzono analizę przyczyn takiego stanu rzeczy.

Analiza chemiczna pierwiastków decydujących o skłonności do pękania lamelarnego (S, N, O) nie wykazała takich różnic w zawartościach tych pierwiastków w badanych stalach, które mogłyby korelować ze zróżnicowaną skłonnością do pękania lamelarnego tych stali. Podobnie analiza obrazu, która objęła zliczenie ilości oraz pomiary powierzchni wtrąceń niemetalicznych w poszczególnych stalach nie przyniosła zróżnicowanych wyników. Niemniej jednak obserwacje przekrojów blachy, przeprowadzone przy użyciu mikroskopu optycznego, jak również obserwacje przełomów pęknięć lamelarnych, przeprowadzone przy użyciu mikroskopu skaningowego, sugerowały różnice w ilościach wtrąceń niemetalicznych w poszczególnych stalach: stal o najwyższej skłonności do pękania lamelarnego (18G2VA) wykazywała najwyższą ilość wtrąceń. Te same obserwacje wykazały istotne różnice w długości wtrąceń niemetalicznych w badanych stalach. Stal o największej skłonności do pękania lamelarnego (18G2VA) charakteryzowała się wtrąceniami wyraźnie wydłużonymi; wtrącenia niemetaliczne w stali najbardziej odpornej na pękanie lamelarne (12GA, NVW) były krótkie lub kuliste. Analiza mikrorentgenowska wtrąceń niemetalicznych wykazała we wszystkich przypadkach obecność wtrąceń siarczkowych. Jedynym wyjątkiem była obecność w stali w gatunku St41U6 niedużych wymiarów tlenków glinu, występujących w towarzystwie siarczków manganu.

10.4. Omówienie wyników badań metodą filmowania

Przeprowadzone badania metodą filmowania pozwoliły na sprecyzowanie następujących uwag i spostrzeżeń:

- We wszystkich próbkach, bez względu na warunki ich przygotowania, można było wyróżnić trzy etapy inicjowania i rozprzestrzenia pęknięć lamelarnych (rys. 67):
 - I - powstawanie oddzielnych mikropęknięć wokół wtrąceń niemetalicznych,
 - II - tworzenie się "tarasów" - mikropęknięcia rozwijały się w kierunku prostopadłym do kierunku przyłożonych obciążeń odkształcających i ewentualnie - łączyły ze sobą,
 - III - tworzenie się "uskoków" - następowało ścinanie czystego materiału bez wtrąceń niemetalicznych pomiędzy równoległymi do siebie "tarasami"; połączone ze sobą "tarasy" tworzyły wyraźne pęknięcia prowadzące do powstania przełomów.
- Pęknięcia lamelarne różniły się swym charakterem w próbkach "wzdłużnych" oraz w próbkach "poprzecznych". W przypadku pierwszym - pęknięcia charakteryzowały się wyraźnymi, długimi tarasami i krótkimi uskokami. W przypadku drugim, na skutek zmienionej w stosunku do obserwowanej powierzchni orientacji wtrąceń, pęknięcia lamelarne stawały się nieregularne, ich tarasy posiadały niewielkie wymiary - zbliżone do wymiarów uskoków.

- Porównując mechanizm inicjowania i rozprzestrzeniania pęknięć lamelarnych w różnych strukturach odpowiadających strukturom występującym w strefach wpływu ciepła złączy spawanych, można było stwierdzić, że:
 - mechanizm ten był bardzo podobny w przypadku materiału rodzimego oraz w przypadkach struktur uzyskanych pod wpływem cykli cieplnych z temperaturami maksymalnymi 300 i 500°C. Oznaczało to, że zmiany zachodzące w stali poniżej temperatury przemiany nie wywierały wpływu na przebieg zjawiska pękania lamelarnego,
 - struktura powstała pod wpływem cyklu cieplnego z temperaturą maksymalną 1300°C sprzyjała powstawaniu pęknięć lamelarnych; w obecności tej struktury pęknięcia były inicjowane przy bardzo niskich odkształceniach i łatwo się rozprzestrzeniały,
 - charakter pękania w strukturze odpowiadającej cyklowi cieplnemu z temperaturą maksymalną 750°C był podobny do charakteru pękania w próbkach "poprzecznych".
- Ocena ilościowa mechanizmu pękania lamelarnego zakończyła się niepowodzeniem. Z powodu nie dość precyzyjnie regulowanej szybkości odkształcania zginanych próbek niemożliwe było skorelowanie kolejnych numerów klitek filmów z wartościami ugięcia próbek. Problem ten mógł zostać rozwiązany, gdyby dysponowano prasą hydrauliczną, charakteryzującą się stałą i dokładnie regulowaną szybkością przesuwu trzpienia gnącego.

10.5. Omówienie wyników badań metodą emisji akustycznej

Przeprowadzone badania metodą emisji akustycznej umożliwiły sprecyzowanie następujących uwag i spostrzeżeń:

- w próbie rozciągania statycznego stali walcowanej w kierunku grubości blachy zjawisku wolnego odkształcania towarzyszy generowanie sygnałów emisji akustycznej - w ilości zależnej od wielkości odkształcania. Do momentu osiągnięcia granicy plastyczności emisja akustyczna jest bardzo duża. Po przekroczeniu granicy plastyczności następuje wyraźne obniżenie natężenia emisji akustycznej aż do całkowitego jej zaniku,
- przy stałej szybkości odkształcania oalkowita ilość sygnałów emisji akustycznej do osiągnięcia zerwania jak i zmiany natężenia emisji akustycznej w trakcie odkształcania zależą od skłonności stali do pękania lamelarnego, charakteryzowanej wielkością przewężenia w kierunku grubości blachy. Dla stali o bardzo dużej skłonności do pękania lamelarnego (o przewężeniu rzędu kilku %) sumaryczna ilość sygnałów emisji akustycznej jest 5-krotnie większa niż dla stali o dużej odporności na pękanie lamelarne (o przewężeniu około 30%). Dla stali o bardzo dużej skłonności do pękania lamelarnego emisja akustyczna praktycznie zanika po przekroczeniu granicy plastyczności i tylko w

- niewielkim stopniu wzrasta w momencie zerwania, który jest nieznacznie przesunięty w czasie w stosunku do momentu przekroczenia granicy plastyczności. Dla stali o braku skłonności do pękania lamelarnego sygnały emisji akustycznej generowane są w różnych ilościach przez dłuższy okres czasu. Po przekroczeniu granicy plastyczności ilość tych sygnałów bardzo wzrasta w momencie zerwania, który następuje po znacznym czasie zwłoki w stosunku do momentu przekroczenia granicy plastyczności. Na rys. 68 przedstawiono zależność całkowitej ilości sygnałów emisji akustycznej do osiągnięcia zerwania oraz granicy plastyczności od wielkości przewężenia stali w kierunku grubości blachy,
- rozciąganie ze stałą szybkością blachy walcowanej w kierunku jej grubości powoduje niejednakowe odkształcanie poszczególnych odcinków tej grubości. Największa niejednorodność odkształcania występuje w środkowym odcinku grubości blachy, w którym zawarta jest największa ilość wtrąceń niemetalicznych. Typowy przebieg przyrostu wydłużenia dla tego odcinka oraz towarzyszące temu przebiegowi zmiany natężenia emisji akustycznej przedstawia rys. 69,
 - prowadzone w celu uzupełnienia wykresu z rys. 69 obserwacje mikroskopowe zmian zachodzących w obszarach występowania wtrąceń niemetalicznych, pod wpływem częściowego rozciągania w kierunku grubości blach walcowanych, potwierdziły (rys. 70), że w blachach tych zachodzi kolejno: stopniowe oddzielanie materiału osnowy od wtrąceń niemetalicznych (I), łączenie wtrąceń ze sobą (II) oraz powstawanie przekoków pomiędzy płaszczyznami wtrąceń (III).

10.6. Przedstawienie mechanizmu inicjowania i rozprzestrzeniania pęknięć lamelarnych

W oparciu o całość wyników uzyskanych w przeprowadzonych badaniach ustalono następujący mechanizm tworzenia się pęknięć lamelarnych w stalowych materiałach walcowanych.

Zjawisko pęknięcia lamelarnego zachodzi w trzech zasadniczych etapach.

W etapie pierwszym następuje oddzielenie materiału osnowy od poszczególnych wtrąceń niemetalicznych. Oddzieleniu towarzyszy intensywne emisja akustyczna wysokiej częstotliwości o wielkości natężenia wprost proporcjonalnej do skłonności stali do pęknięcia lamelarnego. Efektem procesu oddzielania jest powstanie mikroszczelin poziomych (równoległych do powierzchni walcowania stali).

Etap drugi charakteryzuje się łączeniem mikroszczelin w kierunku poziomym. W efekcie połączenia kilku lub kilkunastu mikroszczelin powstają wymieniane w literaturze tzw. tarasy. Tworzeniu tarasów towarzyszy nieduża stała emisja akustyczna (w okresach rozszerzania się mikroszczelin) oraz na jej tle - wyraźne lokalne przyrosty emisji (w momentach gwałtownego łączenia się poszczególnych mikroszczelin ze sobą).

W etapie trzecim następuje łączenie się tarasów w kierunku pionowym (prostopadłym do kierunku walcowania stali). Przejścia od jednego tarasu do drugiego powstają: w przypadkach stali mało skłonnych do pęknięcia lamelarnego - w wyniku płynięcia materiału czystego (bez wtrąceń niemetalicznych), w przypadkach stali bardziej skłonnych do pęknięcia lamelarnego - w wyniku ścinania materiału, który zawiera pojedynczo wtrącenia niemetaliczne. Etap trzeci charakteryzuje się praktycznie brakiem emisji akustycznej; wyraźny przyrost emisji ma miejsce w momencie przejścia pęknięcia lamelarnego w zniszczenie (rozerwanie) materiału.

Niezależnie od podziału zjawiska pęknięcia lamelarnego na trzy etapy można wyróżnić dwa jego okresy. Punktem krytycznym rozdzielającym te okresy jest osiągnięcie granicy plastyczności przez materiał rozciągany w kierunku grubości. Okres od momentu przyłożenia obciążenia do osiągnięcia granicy plastyczności odpowiada etapowi pierwszemu i jest okresem inlojowania pęknięcia lamelarnego. Okres po przekroczeniu granicy plastyczności do zniszczenia jest okresem rozprzestrzeniania pęknięcia lamelarnego.

Ogólny mechanizm pęknięcia lamelarnego jest podobny we wszystkich stalach walcowanych, zawierających wtrącenia niemetaliczne. Pewne różnice obserwuje się natomiast w etapach pęknięcia, w zależności od skłonności stali do pęknięcia lamelarnego (od zawartości wtrąceń niemetalicznych i przebieżenia w kierunku grubości blachy). W przypadkach stali mało i średnio skłonnych trzy etapy pęknięcia są wyraźnie rozgraniczone i przebiegają w mniej więcej jednakowych odcinkach czasu. W przypadkach stali bardzo skłonnych do pęknięcia lamelarnego odcinane miejsce zajmuje etap drugi, natomiast praktycznie zanika etap trzeci.

10.7. Wnioski

W oparciu o przeprowadzone badania zestawiono następujące wnioski:

1. Zjawisko pęknięcia lamelarnego w stalowych materiałach walcowanych zachodzi w trzech etapach:

- na skutek oddzielania materiału osnowy od poszczególnych wtrąceń niemetalicznych powstają mikroszczeliny równoległe do powierzchni walcowania stali,
- mikroszczeliny rozszerzają się i łączą ze sobą, tworzą tzw. tarasy,
- w wyniku płynięcia lub ścinania w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania stali powstają przejścia pomiędzy poszczególnymi tarasami.

Etap pierwszy, to okres inlojowania pęknięcia lamelarnego, etapy drugi i trzeci, to okres rozprzestrzeniania pęknięcia aż do całkowitego zniszczenia (rozerwania).

2. Warunkiem koniecznym wystąpienia pęknięcia lamelarnego jest przekroczenie granicy plastyczności w kierunku grubości stali walcowanej.

Do momentu osiągnięcia granicy plastyczności zachodzi tylko inicjowanie pęknięć, rozprzestrzenianie pęknięć ma miejsce po przekroczeniu granicy plastyczności.

3. Struktura metalograficzna stali nie posiada wyraźnego wpływu na rozprzestrzenianie pęknięć lamelarnych, podobne są mechanizmy pęknięcia w strukturze stali w obszarze materiału rodzimego jak i w strukturach występujących w większości obszaru strefy wpływu ciepła złączy spawanych. Jedynie struktura przegrzana (występująca w strefie wtopienia lub bezpośredniej bliskości tej strefy) ułatwia powstawanie pęknięć lamelarnych.
4. Dysponując odpowiednią aparaturą do wykrywania pęknięcia lamelarnego w złączach spawanych można stosować metodę emisji akustycznej z analizą sygnałów wysokiej częstotliwości. Czujnik emisji akustycznej należy dołączyć do złącza bezpośrednio po zakończeniu procesu spawania. Stała emisja akustyczna o dużym natężeniu towarzyszy odkształceniom sprężystym (do osiągnięcia R_e) i okresowi inicjowania pęknięć lamelarnych. Stała emisja akustyczna o bardzo małym natężeniu z pojawiającymi się na jej tle chwilowymi przyrostami emisji towarzyszą odkształceniom plastycznym i rozprzestrzenianiu się pęknięć lamelarnych.
5. Istnieje prosta możliwość zmodyfikowania oryginalnej próby zginania płytki zaproponowanej do wprowadzenia do norm odbiorczych w Wielkiej Brytanii. Stosując oprzyrządowanie zrealizowane w ramach przeprowadzonych badań, w próbach zginania płytki uzyskuje się wyniki znacznie dokładniejsze oraz w bardzo łatwy i szybki sposób.

11. LITERATURA

- [1] M. Watanabe - The pull-out fracture in rolled steel plates. Symposium on Welding in Shipbuilding. 1961, s. 219-225.
- [2] J. Pilarczyk - Pęknięcie lamelarne w stalowych konstrukcjach spawanych. Przegląd Spawalnictwa, 1974, s. 99-105.
- [3] A.W. Brearley, H. Brearley - Ingots and Ingot Moulds. Longman, Green and Co, London, 1918, s. 198-207.
- [4] J. Pilarczyk - Określenie skłonności stali 15G2ANb do pęknięcia lamelnego. Orzeczenie nr NM/53/73 Instytutu Spawalnictwa.
- [5] Z. Żmuda - Analiza skłonności krajowych stali konstrukcyjnych do pęknięcia lamelnego. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Śląska. Wydział Mechaniczny-Technologiczny, 1974.
- [6] L. Warwas, H. Smyczek, Z. Wasik - Badania skłonności do rozwarstwień blach ze stali w gatunku 15G2ANb. Sprawozdanie nr B-2 Zakładu Badawczego Huty Batory, 1975.
- [7] J. Pilarczyk, H. Smyczek, L. Warwas - Skłonność do pęknięcia lamelnego blach okrętowych (w trakcie publikowania).
- [8] J.C.M. Farrar, R.E. Dolby - An investigation into lamellar tearing. Met.Constr. and B.W.J. 1969, s. 32-39.
- [9] H. Wormington - Lamellar tearing in silicon killed boiler plate. Welding and Metal Fab. 1967, s. 371-373.
- [10] A. Bellen, M.J. Spanraft, Van der Veen - Some steelmakers experience on improving the resistance of steel plates to lamellar tearing. Doc. IIS/IIW IX-778-72.
- [11] A. Nakashima - First International Symposium of the Japan Welding Society 1971. Proceedings, t. 4, s. 78.
- [12] M. Watanabe, M. Araki, H. Nonora, H. Harasawa - Lamellar tearing in multirun fillet welds proposal of cracking tests for assessing susceptibility to lamellar tearing in rolled plate. First International Symposium of the Japan Welding Society 1971, Proceedings, t. 4, s. 25-27.
- [13] W. Schönherr - On the tendency of steels to lamellar tearing in welded constructions: cases of damage, testing method, results for St37. Doc. IIS/IIW IX-856-73.
- [14] G. Bernard - Arrachement lamellaire et anisotropie des produits laminés. Sprawozdanie IRSID (Francja) Nr RI 426. 1974.
- [15] D.M. Nicholls - An investigation of lamellar tearing. DAE Thesis. Cranfield Institute of Technology 1966.
- [16] T.J. Baker, J.A. Charles - Influence of deformed inclusions on the short transverse ductility of hot rolled steels. ISI Conference Proceedings, Scarborough, 1971, s. 79-87.
- [17] G. Bernard, M. Grumbach, F. Molléxe - Inclusions in steel plates and mechanical anisotropy. Referat na Kongres Directionality of properties in steel products. Londyn 28.XI.1974.
- [18] C.E. Sims, M.A. Saller, F.W. Boulger - Trans. Am. Foundrymen's Society, 1949, s. 233.
- [19] L. Luyckx, J.R. Bell, A. Mc Lean, M. Korczynsky - Sulfide shape Control in high strength low alloy steels. Met. Trans. 1970, s. 3341-3350.
- [20] L. Meyer, F. Heisterkamp, C. Strassburger - Symposium Low Alloy High Strength Steels. Nürnberg 1970, s. 9-15.
- [21] J.H. Little, W.J.M. Henderson - Effect of sulphide inclusions on the anisotropy of ductile Charpy shelf energy. BSC/ISI Conference Proceeding, Scarborough 1971, s. 182-189.

- [22] W. Dahl, H. Hengstenberg, C. Duren - Verhalten der verschiedenen Sulfidformen bei der Verformung und ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Stahl und Eisen 1966, s. 796-817.
- [23] D. Nagel, W. Schönherr - Strength and deformation properties of structural steels in the thickness direction. Met. Constr. B.W.J. 1969, s. 64-67.
- [24] F.A. Heiser, R.W. Hertzberg - Structural control and fracture anisotropy of banded steel. J.I.S.I. t. 209, nr 12, s. 975-980.
- [25] H. Vogels, F. Bruning - Influence de la forme des inclusions non métalliques sur les caractéristiques mécaniques des tôles fortes. Archiv Eisenh. 1964, s. 115-127.
- [26] S. Lalik - Wpływ temperatury końca walcowania oraz temperatur wytrzymała na skłonność do pęknięcia lamelarnego stali o podwyższonej wytrzymałości. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny-Technologiczny, 1974.
- [27] H.J. Meyer - Beobachtungen bei der Untersuchung von Rissen in Blechen und Stellen senkrechter Krafteinleitung. Archiv Eisenh. 1964, s. 903-908.
- [28] J.C.M. Farrar, J.A. Charles, R.E. Dolby - Metallurgical aspects of lamellar tearing. ISI, Conf.Proc. 1971, s. 171-181.
- [29] D.N. Elliott - Lamellar tearing in multipass joints. Welding Journal 1969, s. 409s-416s.
- [30] J.E.M. Jubb - Lamellar tearing. W.R.C. Bulletin nr 168, 1971.
- [31] M. Evrard, J. Dubresson, Y. Le Penven - Possibilités offertes par l'examen ultrasonore pour la détermination de la sensibilité d'un produit laminé à l'arrachement lamellaire. Soud.Tech.Conn. 1974, s. 385-393.
- [32] J.C.M. Farrar - The influence of banded structures and inclusions on steels during welding - The problem of lamellar tearing. PhD Thesis, Churchill College, Cambridge, 1970.
- [33] J. Lombardini - Cracking as a criterion of weldability. Met. Constr. B.W.J. 1969, s. 40-43.
- [34] Y. Amemiya, M. Satake, K. Kajimoto, K. Ohba - Effect of welding procedure and steel materials on prevention of lamellar tearing. Doc. IIS/IIW IX-780-72.
- [35] A.D.E. Thomson, P.R. Christopher, J. Bird - Short transverse properties of certain high strength steels. Trans. ASME 1968, s. 627-635.
- [36] R.P. Oates, R.D. Stout - A quantitative weldability test for susceptibility to lamellar tearing. Welding Journal 1973, s. 481s-491s.
- [37] H. Słowiński - Badania skłonności do pęknięcia lamelarnego stali o podwyższonej wytrzymałości w oparciu o próby złącz spawanych. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny-Technologiczny, 1975.
- [38] J. Heuschkel - Anisotropy and Weldability. Welding Journal 1971, s. 110s-126s.
- [39] H. de Leiris - L'arrachement lamellaire et l'essai des tôles d'acier dans la direction du travers court. Bull. Ass. Tech. Mar. et Aero 1971, s. 303-318.
- [40] Japanese Report on Lamellar Tearing for Sub-Commission IXF. Doc. IIS/IIW IX-832-73.
- [41] G. Wold, T. Kristoffersen - Development of method for measuring susceptibility of steel plate to lamellar tearing. Det Norske Veritas Publication nr 83, 1973.
- [42] S. Hasebe, K. Bessyo, N. Nito, Y. Asai, M. Nakamura - Lamellar tearing and through thickness properties. Doc. IIS/IIW IX-839-73.

- [43] P. Amiot, A. Brodeau, H. de Leiris, Y. Le Penven - Essai de traction sur éprouvettes Brodeau prélevées dans les produits laminés. Doc. IIS/IIW IX-828-73 i IX-829-73.
- [44] M.L. Drury - An investigation into the use of a through thickness bend test to determine steel plate susceptibility to lamellar tearing. M.Sc. Thesis, Cranfield Institute of Technology, 1971.
- [45] M.L. Drury, J.E.M. Jubb - Lamellar Tearing and the Slice Bend Test. Welding Journal 1973, s. 88s-95s.
- [46] N.O. Struwe - The Z test for testing the mechanical properties of rolled steel in the thickness direction. Scand. J. Metall. 1973, s. 204-206.
- [47] H. Gerbeaux, P. Berthet, A. Michel - Appareillage pour mesure de la rupture dans le sens travers mince des produits laminés. Soud. Techn. Conn. 1972, s. 140-141.
- [48] A.H. Cottrell - The mechanical properties of matter. John Wiley and Sons, 1964.
- [49] J.B. Wade, C.B. Heynes - The welding of high strength structural steels. Austr. Weld. J. 1970, s. 9-24.
- [50] J.C.M. Farrar - Inclusions and susceptibility to Lamellar Tearing of Welded Structural Steels. Welding Journal 1974, s. 321s-331s.
- [51] J.C.M. Farrar, R.E. Dolby - Investigation into lamellar tearing in welded structural steels. Part A and B. Weld. Inst. Rept. M/37/69, 1969.
- [52] K.E. Easterling - A mechanism of lamellar tearing in welded constructional steels. Institutionen for Konstruktionsmaterial Göteborg. Sprawozdanie R 145/72, 1972.
- [53] A.R. Troiano - The Role of hydrogen and other interstitials in the Mechanical Behaviour of Metals. Trans. A.S.M. 1960, s. 54-80.
- [54] R.A. Oriani, P.H. Josephic - Testing of the Decohesion Theory of Hydrogen - Induced Crack Propagation, Scripta Met. 1972, s. 681-688.
- [55] J. Pilarczyk - A study of the mechanism of lamellar tearing. Cranfield Institute of Technology Report, 1963.
- [56] T.E. Clifton - The Design and construction of a weld heat-affected zone simulator. Co A Note MAT. No 18.
- [57] J. Hammond - Metallurgical aspects of lamellar tearing. DAE Thesis, Cranfield Institute of Technology, 1968.
- [58] S. Kanazawa - On the Assessment of the Lamellar Tearing Susceptibility of Steel Plate. Doc. IIS/IIW IX-840-73.

12. ZESTAWIENIE TABLIC

Tablica 1

Przewężenia w kierunku grubości blachy
w zależności od zawartości siarki i rzutowanych długości wtrąceń [17]

Nr stali	Grubość blachy mm	S%	P cm/cm ²	Z%
1	20	0,016	25	6,4
2	20	0,021	31	5,5
3	20	0,014	12,5	32
4	20	0,011	12	36
5	20	0,006	3	65,5
6	20	0,016	15,5	21,5
7	28	0,023	16,5	28
8	25	0,014	5	77
9	30	0,032	17	20
10	30	0,034	21	18,5
11	70	0,017	7,2	42
12	70	0,021	7	59
13	60	0,005	5	55
14	16	0,009	4	51
15	20	0,017	27,5	11
16	16	0,004	4	66
17	22	0,016	18	25
18	22	0,020	21	8,5
19	18	0,018	29	5,6
20	18	0,018	21	21,5

Tablica 2

Kryteria oceny skłonności stali do pękania lamelnego
według różnych autorów

Pozycja literaturowa	%S	Z% (w kierunku grubości)	Inne	Rodzaj próby
[10]	< 0,020 (w przypadkach zastosowań ogólnych) < 0,015 (w przypadkach zastosowań szczególnych)	-	$\frac{R_T}{R_L} > 0,9$	Rozciąganie w kierunku grubości
[38]	-	> 15	A > 6%	Rozciąganie w kierunku grubości

od. tablicy 2

Poszyja literaturowa	%S	Z% (w kierunku grubości)	Inne	Rodzaj próby
[11]	0,010 (w przypadkach zastosowań krytycznych)	-	-	Otworowa
[39]	-	-	Z > 20% (zmniejszenie przekroju)	Brodeau
[40]	< 0,015	≥ 15	$\frac{R_T}{R_L} > 0,9$	Otworowa
[38] A ¹⁾ B C	< 0,007 < 0,010 < 0,020	≥ 25 ≥ 15 ≥ 8	a ≤ 8% ²⁾ a ≤ 11% a ≤ 16%	Różne. Otworowa, Cranfield, L, rozciągania w kier. grubości
[41]	-	≥ 10	-	Rozciąganie w kierunku grubości
[42]	< 0,010	-	-	Różne. Otworowa, rozciąganie w kierunku grubości

1) A, B i C są klasami jakości.

2) Wyniki specjalnej próby rozciągania materiału.

Tablica 3

Zestawienie stali wybranych do badań

Nr stali	Gatunek	Grubość mm	Stan dostawy	Produkcja
1	QT35	30	Ulepszona cieplnie	Angielska
2	18G2VA	36	Normalizowana	Krajowa
3	St41U6	32	Normalizowana	Krajowa
4	St36K	32	Normalizowana	Krajowa
5	12GA	30	Normalizowana	Krajowa
6	NVW	20	Normalizowana	Szwedzka
7	NVA	20	Normalizowana	Japońska

Tablica 4

Składy chemiczne badanych stali, %

Nr sta- li	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	N ₂	O ₂
1	0,11	0,81	0,11	0,023	0,023	0,70	1,06	-	0,010	0,03	-	0,0040	-
2	0,18	1,54	0,46	0,032	0,033	0,21	0,06	0,07	0,05	0,30	-	0,0066	0,0020
3	0,14	0,84	0,22	0,021	0,024	0,05	0,04	0,06	0,04	-	-	0,0052	0,0027
4	0,13	0,59	0,19	0,015	0,023	0,01	0,02	0,03	0,04	-	0,01	0,0047	0,0023
5	0,14	1,26	0,32	0,024	0,018	0,02	0,02	0,03	0,032	-	-	0,0051	0,0016
6	0,17	1,08	0,31	0,017	0,020	0,02	ślady	-	0,03	-	-	0,0017	0,0037
7	0,18	0,98	ślady	0,019	0,015	0,01	ślady	-	0,02	-	-	0,0044	0,0022

Tablica 5

Wyniki prób zginania
(Próbki niesymulowane "wzdłużne" i "poprzeczne")

Próbki		Ugięcie próbki mm		
	Lp.	do wystąpienia pierwszego mikro-pęknięcia	do tworzenia tarasów	do powstania całkowitego pęknięcia lamelarnego
"wzdłużne"	1	Próbki do badań wstępnych		
	20	Próbki do badań wstępnych		
	21	0,18	0,66	0,81
	22	0,13	0,71	0,89
	23	0,15	0,66	0,86
	24	0,18	0,71	0,86
	25	0,13	0,69	0,81
	26	0,18	0,58	0,89
	27	Próbka filmowana	-	-
	28	0,13	0,66	0,76
"poprzeczne"	29	Próbka filmowana	-	-
	30	0,15	0,69	0,89
	31	0,28	0,56	1,57
	32	Próbka filmowana	-	-
	33	0,38	0,63	1,40
	34	0,33	0,61	1,47
	35	0,28	0,58	1,52
	36	0,36	0,56	1,50
	37	0,41	0,66	1,45
	38	Próbka filmowana	-	-
	39	Próbka filmowana	-	-
	40	0,38	0,61	1,42

Wyniki prób zginania (Próbki symulowane "wzdłużne")

Próbki		Ugięcie próbki mm		
T _{max} cyklu ciepln.	Lp.	do wystąpienia pierwszego mikro- pęknięcia	do tworzenia ta- rasów	do powstania cał- kowitego pęknię- cia lamelarnego
1	2	3	4	5
310°C	42	0,18	0,53	0,74
275°C	43	0,10	0,58	0,76
285°C	44	Próbka filmowana		
280°C	45	0,18	0,53	0,94
280°C	46	0,13	0,66	0,76
290°C	47	Próbka filmowana		
310°C	50	Próbka do badań metalograficznych		
300°C	51	0,13	0,61	0,74
295°C	52	Próbka filmowana		
295°C	53	0,18	0,58	0,97
505°C	62	Próbka filmowana		
505°C	63	0,10	0,51	0,79
495°C	64	Próbka filmowana		
500°C	65	Próbka do badań metalograficznych		
520°C	66	0,18	0,56	0,84
520°C	67	0,15	0,53	0,89
510°C	69	0,18	0,64	0,99
495°C	70	0,10	0,56	0,84
1325°C	82	0,03	0,36	0,66
1310°C	83	Próbka filmowana		
1320°C	85	0,03	0,41	0,69
1320°C	86	Próbka do badań metalograficznych		
1310°C	87	Próbka filmowana		
1270°C	88	0,05	0,38	0,66
1325°C	89	0,05	0,41	0,71
1290°C	90	0,05	0,46	0,66
1320°C	91	0,08	0,38	0,66
1300°C	93	0,08	0,43	0,71
775°C	103	0,20	0,51	0,81
770°C	104	0,20	0,46	0,76
745°C	105	0,25	0,56	0,94
760°C	106	Próbka filmowana		
770°C	107	0,20	0,58	0,97
770°C	108	0,25	0,48	0,91
770°C	109	Próbka do badań metalograficznych		

cd. tablicy 6

1	2	3	4	5
745°C	110	0,20	0,46	0,89
765°C	111	0,23	0,51	0,71
760°C	112	Próbka filmowana		
770°C	113		0,23	0,53
770°C	114	0,25	0,46	0,94
760°C	115	0,20	0,51	0,89

Tablica 7.

Wyniki prób zginania ujęte syntetycznie

Próbki	Ugięcie próbki mm		
	do wystąpienia pierwszego mikropęknięcia	do tworzenia tarasów	do powstania całkowitego pęknięcia lamelarnego
Materiał rodzimy "wzdłużne"	0,13-0,18	0,66-0,71	0,81-0,89
Materiał rodzimy "poprzeczne"	0,28-0,39	0,56-0,64	1,35-1,57
SWC - 300°C "wzdłużne"	0,10-0,18	0,53-0,66	0,74-0,97
SWC - 500°C "wzdłużne"	0,01-0,25	0,51-0,64	0,79-0,99
SWC - 1300°C "wzdłużne"	0,04-0,08	0,34-0,46	0,66-0,71
SWC - 750°C "wzdłużne"	0,20-0,25	0,46-0,58	0,71-0,97

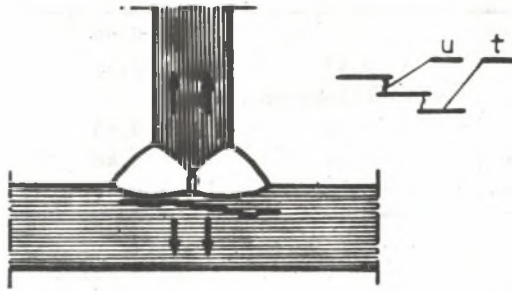
Tablica 8

Wyniki średnie - prób "Z"

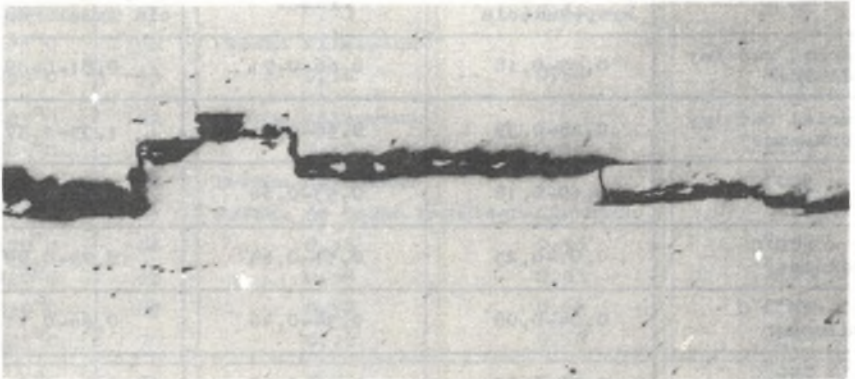
(wyliczone dla każdej stali w oparciu o 15 wyników szczegółowych)

Nr stali	Gatunek	Re daN/mm ²	Rm daN/mm ²	A %	Z %	Uwagi
2	18G2VA	25	57	5	5	Typowy przełom przedstawiono na rys. 42
3	St41U6	28	40	16	16	
4	St36K	26	38	19	23	Typowy przełom przedstawiono na rys. 43
5	12GA	30	47	20	30	
6	NVA	30	44	16	27	Typowy przełom przedstawiono na rys. 44
7	NVW	23	43	18	31	

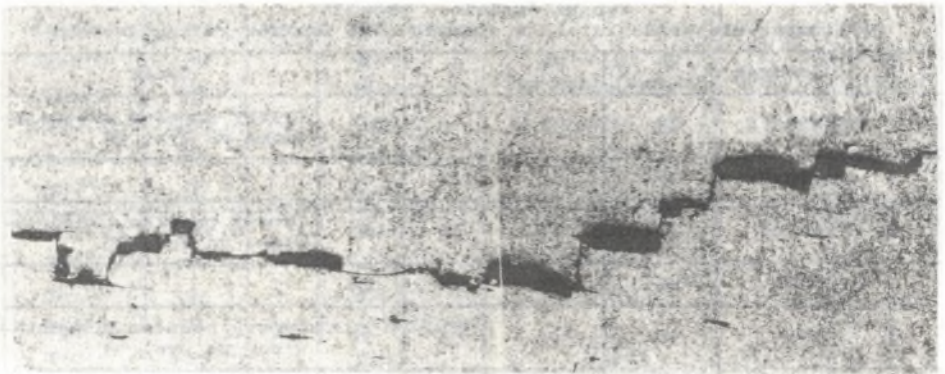
13. ZESTAWIENIE RYSUNKÓW



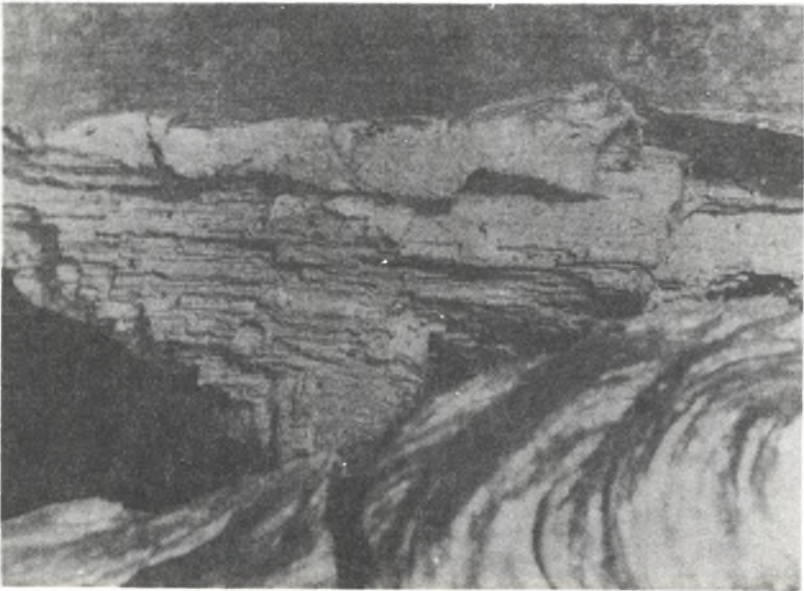
Rys. 1. Typowe pęknięcie lamelarne w strukturze pasmowej oraz szczegóły pęknięcia
t - taras, u - uskok



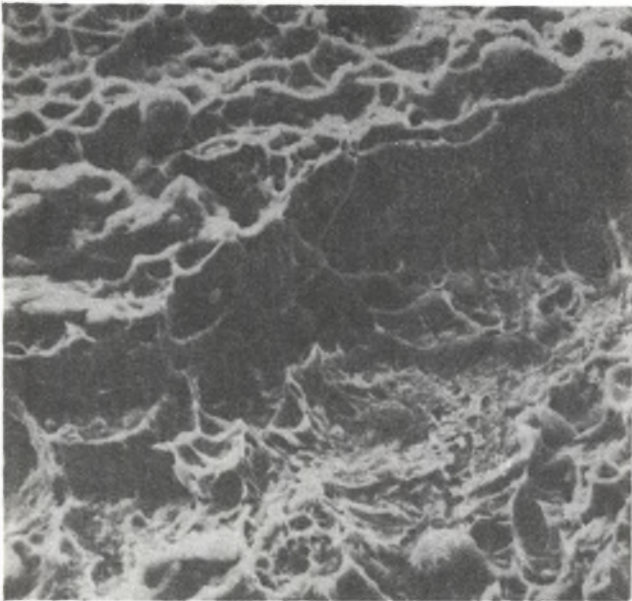
Rys. 2. Pęknięcie lamelarne w materiale blachy (nietrawione, 50x)



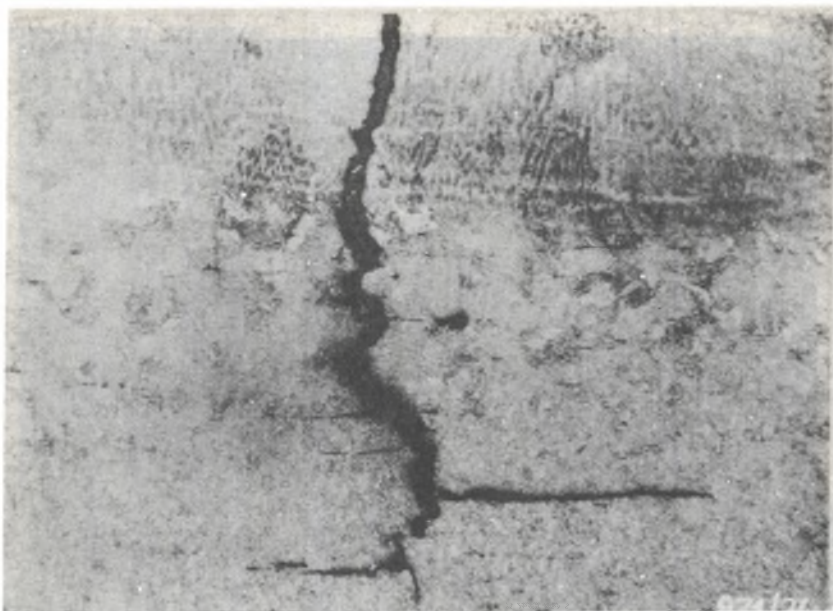
Rys. 3. Pęknięcie lamelarne w strefie wpływu ciepła (Nital, 50x)



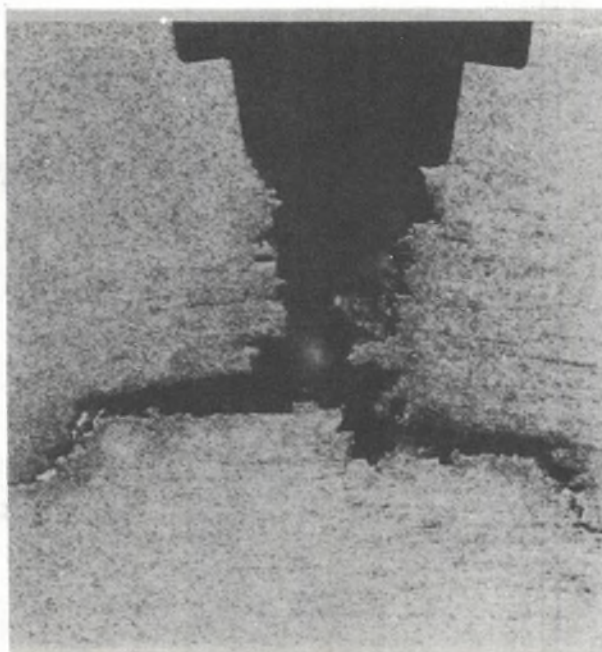
Rys. 4. Przełom pęknięcia lamelarnego w konstrukcji spawanej, która uległa awarii (2x)



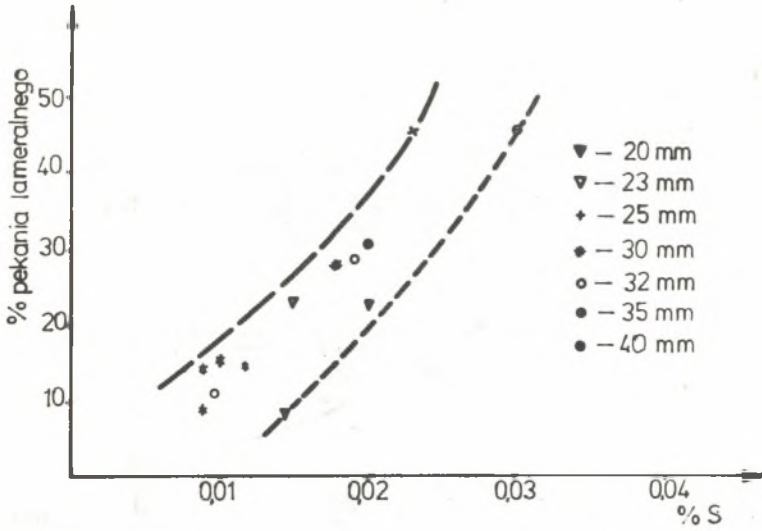
Rys. 5. Przełom pęknięcia lamelarnego w powiększeniu, z widocznym przejściem z jednego tarasu przez uskok na taras drugi (mikroskop skaningowy, 1000x)



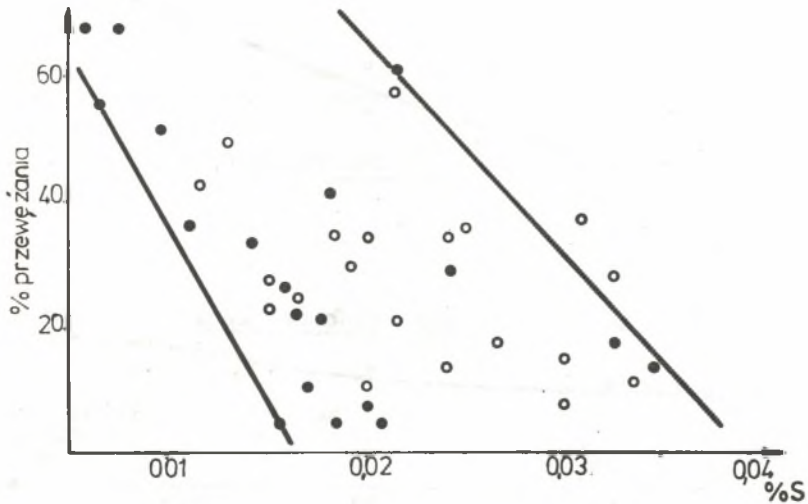
Rys. 6. Pęknięcie lamelarne w blaszce, zainicjowane poprzecznym pęknięciem gorącym w spoinie wielowarstwowej (Traw. Nital, 50x)



Rys. 7. Pęknięcie lamelarne zainicjowane pęknięciem kruchym (Traw. Nital, 5x)

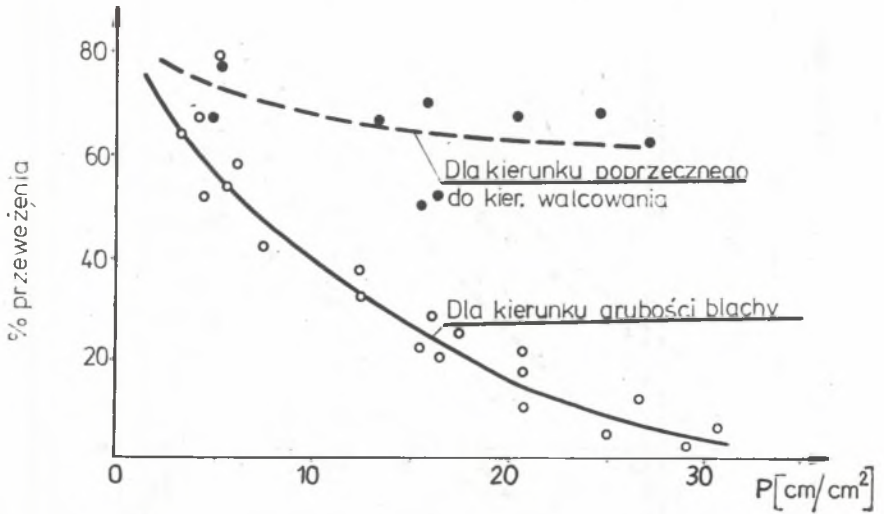


Rys. 8. Wpływ zawartości siarki na skłonność do pekania lamelarnego (wyniki próby Cranfield) [12]

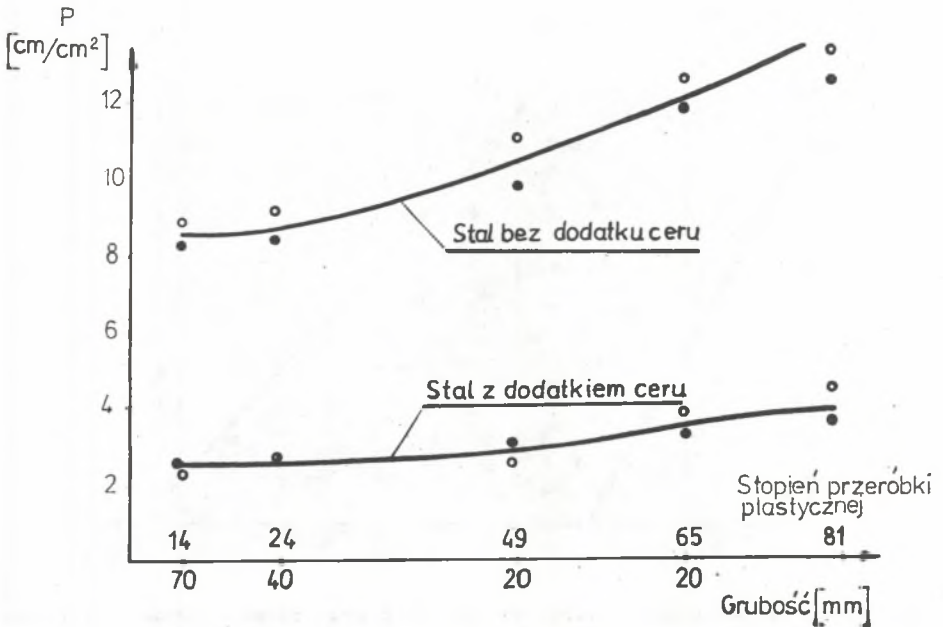


Rys. 9. Wpływ zawartości siarki na wielkość przewężania w kierunku grubości blachy

○ - wyniki wg badań [13], ● - wyniki wg badań [14]



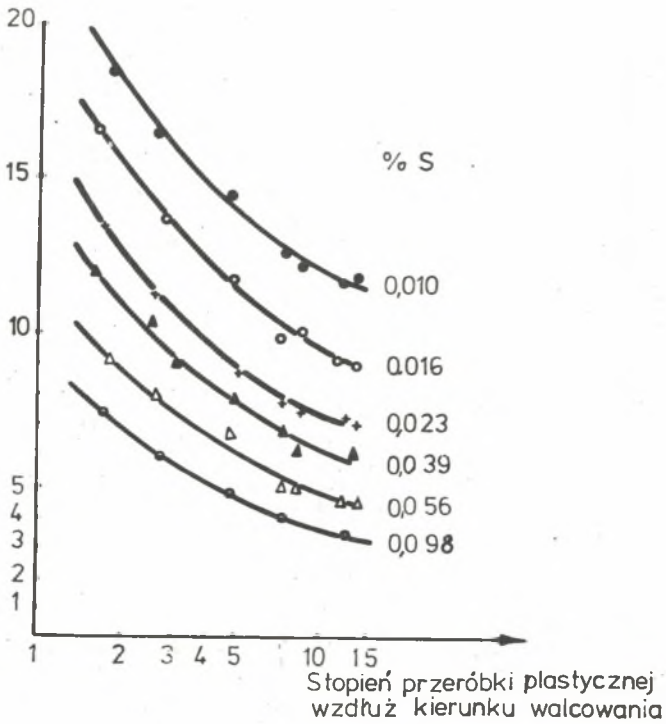
Rys. 10. Wpływ rzutowanej długości wtrąceń na przewężenie [17]



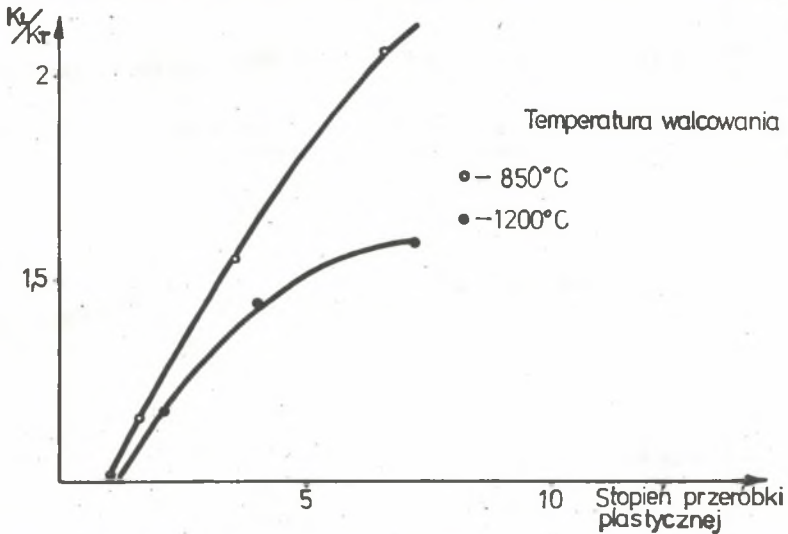
Rys. 11. Wpływ grubości blachy (stopnia przeróbki plastycznej) na rzutowaną długość wtrąceń [17]

● - w $\frac{1}{4}$ grubości blachy, ○ - w połowie grubości blachy

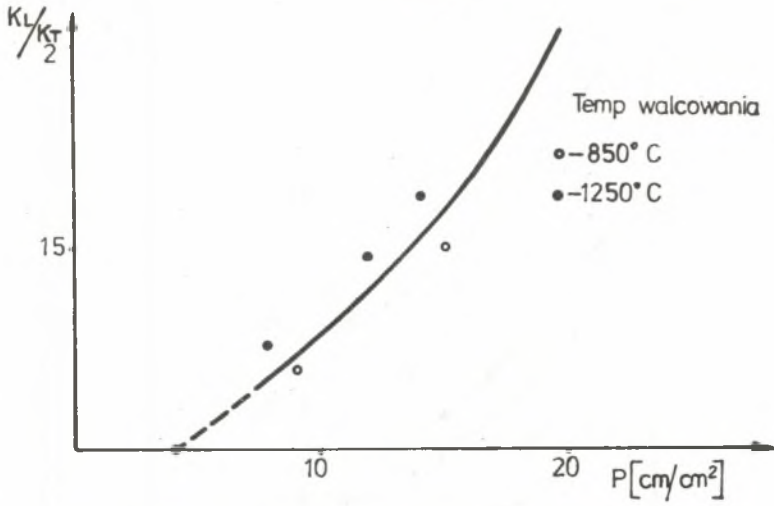
K_v w $+20^{\circ}\text{C}$
[da] / cm^2



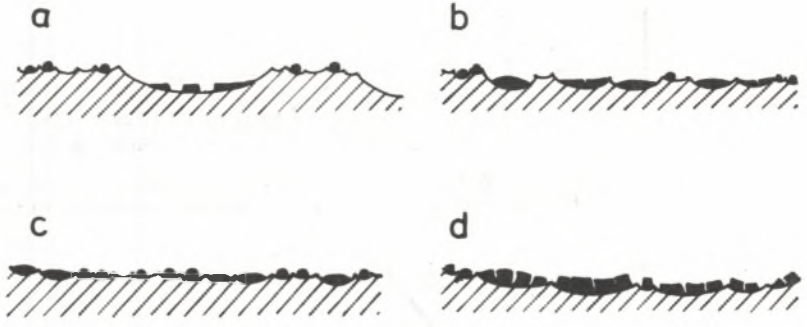
Rys. 12. Wpływ stopnia przeróbki plastycznej wzdłuż głównego kierunku walcowania na zmianę udarności w poprzek kierunku walcowania [19]



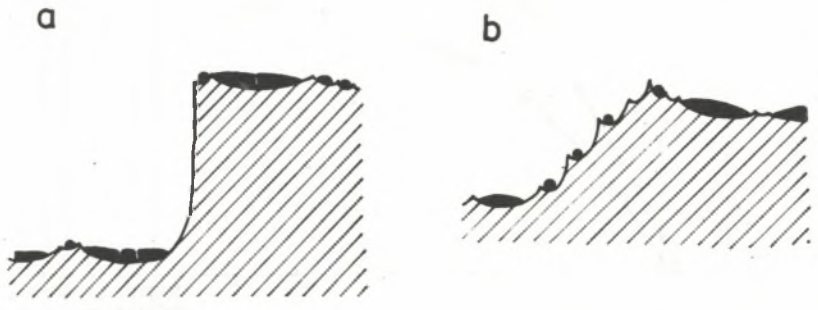
Rys. 13. Wpływ stopnia przeróbki plastycznej na stosunek udarności wzdłuż kierunku walcowania (K_L) do udarności w poprzek kierunku walcowania (K_T) [17]



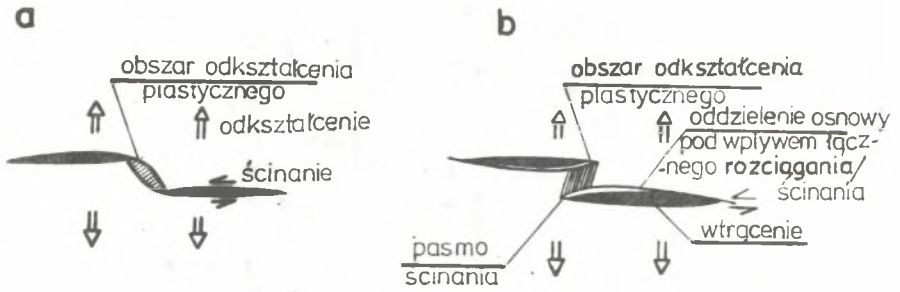
Rys. 14. Wpływ rzutowanej długości wtrąceń na stosunek udarności wzdłuż kierunku walcowania (K_L) do udarności w poprzek kierunku walcowania (K_T) [17]



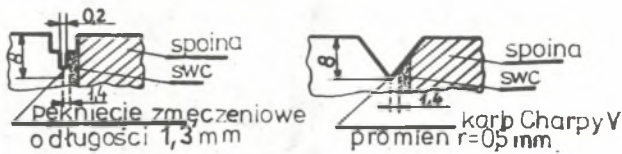
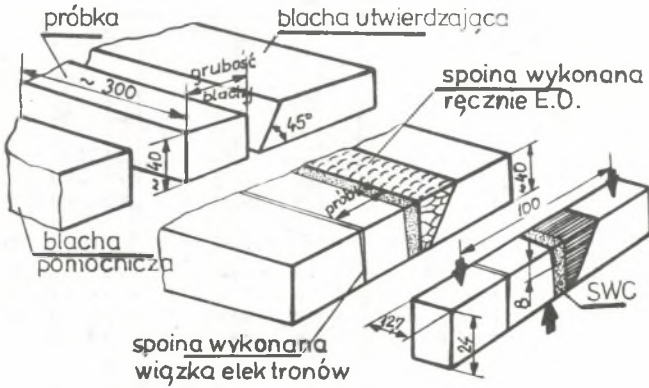
Rys. 15. Schematy ułożenia wtrąceń niemetalicznych na jednej płaszczyźnie, na przekroju blachy walcowanej [32]



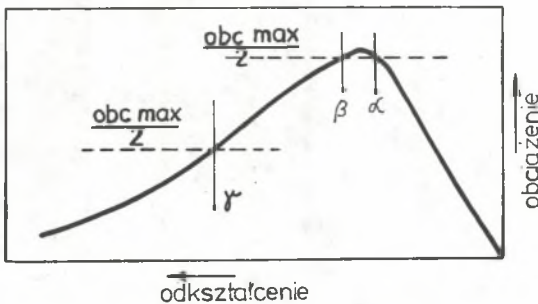
Rys. 16. Schematy ułożenia wtrąceń niemetalicznych na dwóch sąsiednich płaszczyznach, na przekroju blachy oraz pomiędzy tymi płaszczyznami [32]



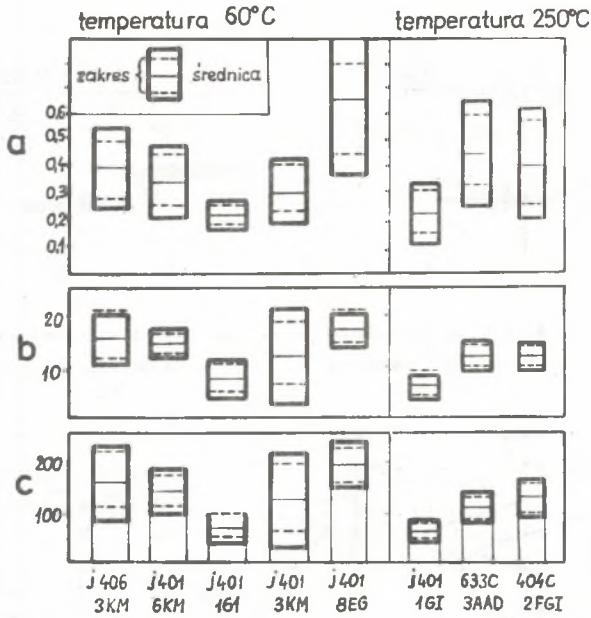
Rys. 17. Model zachodzenia zjawiska pękania lamelarnego [49]
 a - uogólniony model pękania, b - rozwijanie się pasma ścinania



Rys. 18. Próbka z karbem do próby zginania [51]



Rys. 19. Typowa krzywa przedstawiająca zależność wskazań czujnika odkształceń od wielkości siły zginającej w próbie zginania próbki z karbem [50]



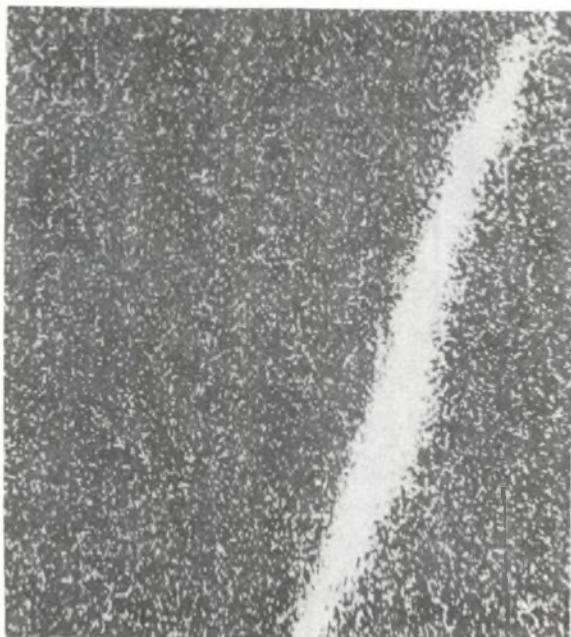
Rys. 20. Zestawienie wyników prób zginania próbek z karbem [50]

a) kryterium odporności na inicjowanie pęknięcia lamelarnego (α), b) wskaźnik odporności na rozprzestrzenianie pęknięcia lamelarnego w poprzek pasm wtrąceń niemetalicznych ($\eta-\beta$), c) praca zużyta na zainicjowanie i rozprzestrzenienie pęknięcia lamelarnego (Δ)

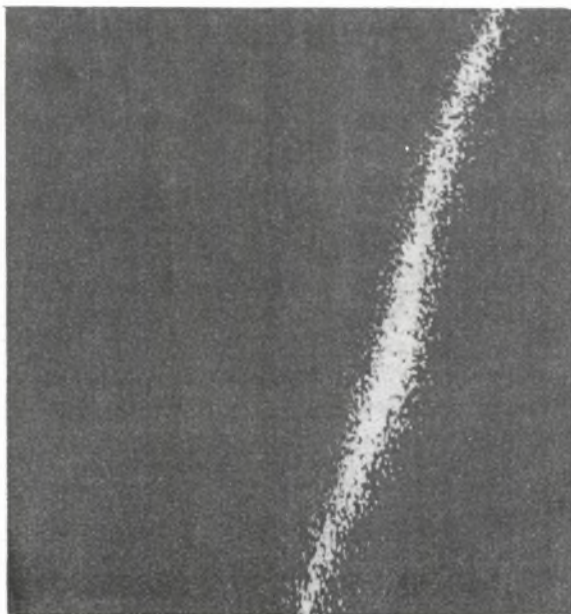
a)



b)



c)



Rys. 21. Wydłużone wtrącenie siarczku manganu. Stal 18G2VA (nr 2), powiększenie 3000x

a - wygląd wtrącenia, b - rozkład manganu, c - rozkład siarki

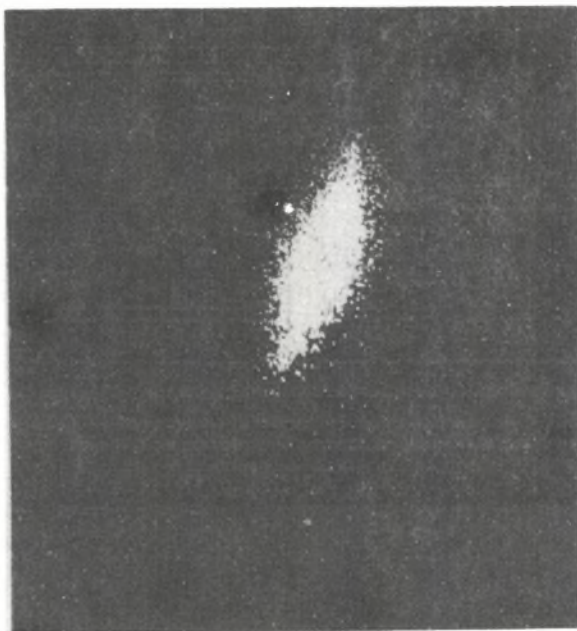
a)



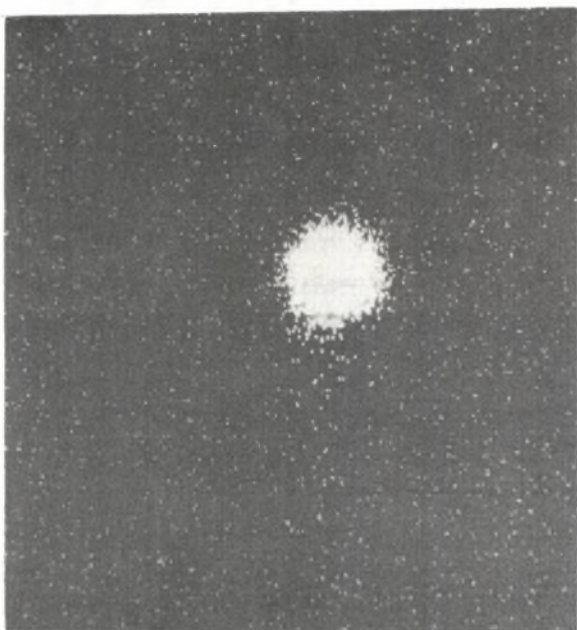
b)



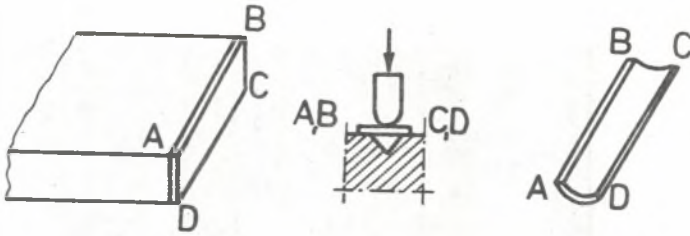
c)



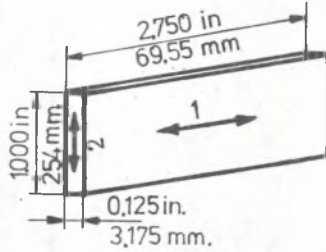
d)



Rys. 22. Wtrącenia złożone w stali St41U6 (nr 3). Powiększenie 3000x
a - wygląd wtrącenia, b - rozkład manganu, c - rozkład siarki, d - rozkład
glinu

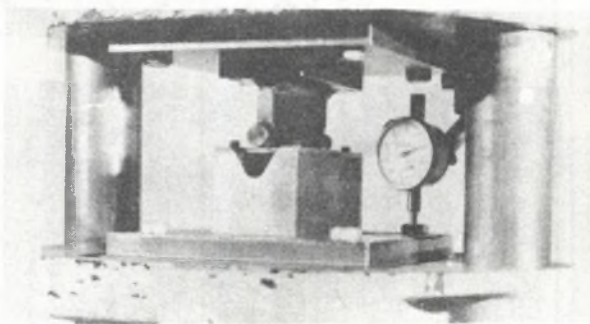


Rys. 23. Próba zginania płytki

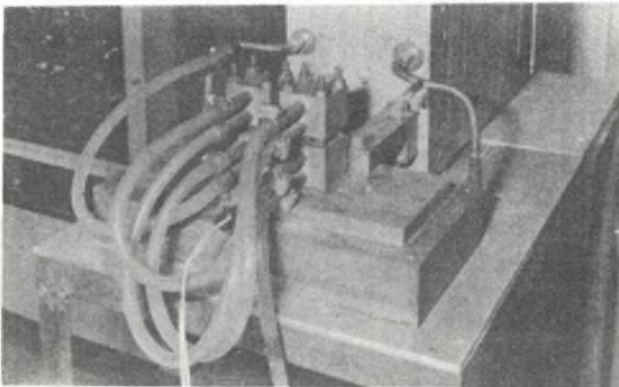


Rys. 24. Próbkę do próby zginania płytki

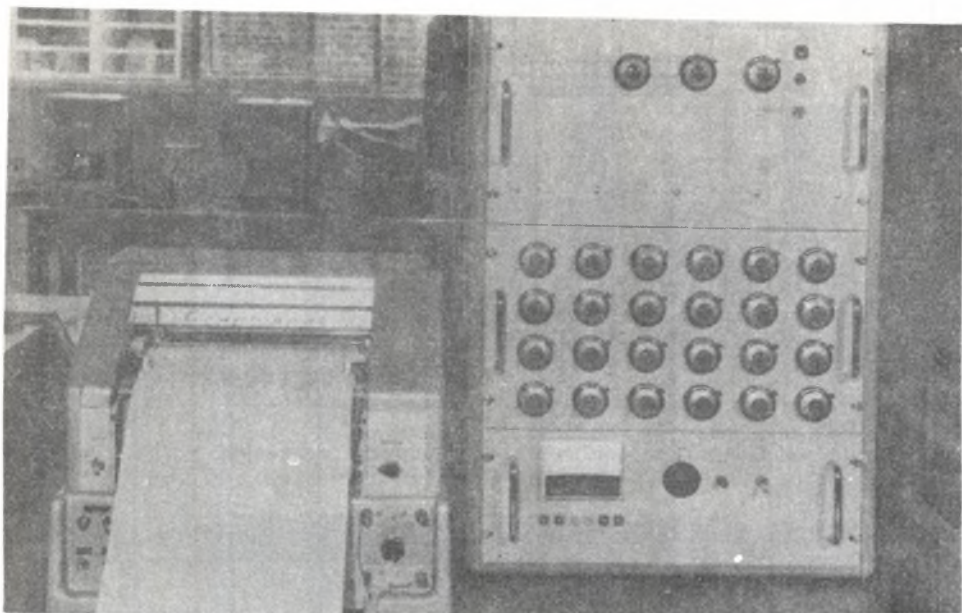
"1" - kierunek walcowania lub kierunek poprzeczny do kierunku walcowania,
"2" - kierunek prostopadły do powierzchni walcowania



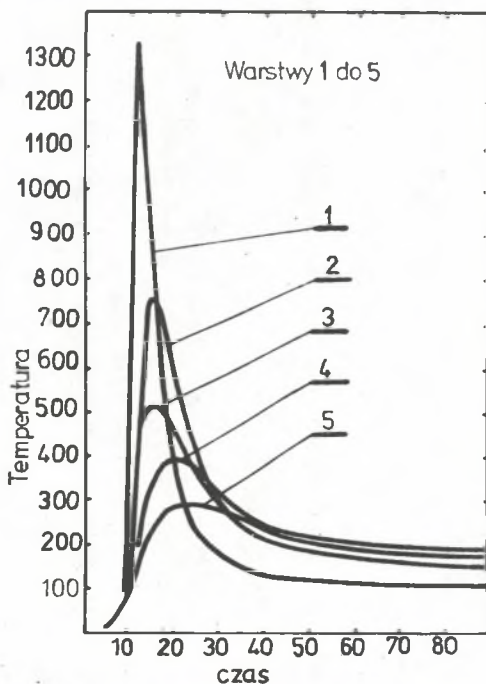
Rys. 25. Próba zginania płytki w trakcie realizacji



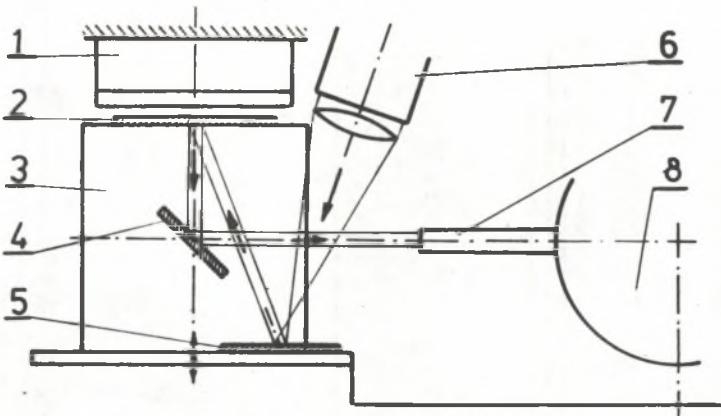
Rys. 26. Układ nagrzewający i chłodzący symulatora cykli cieplnych [56]



Rys. 27. Programator i rejestrator symulatora cykli cieplnych [56]

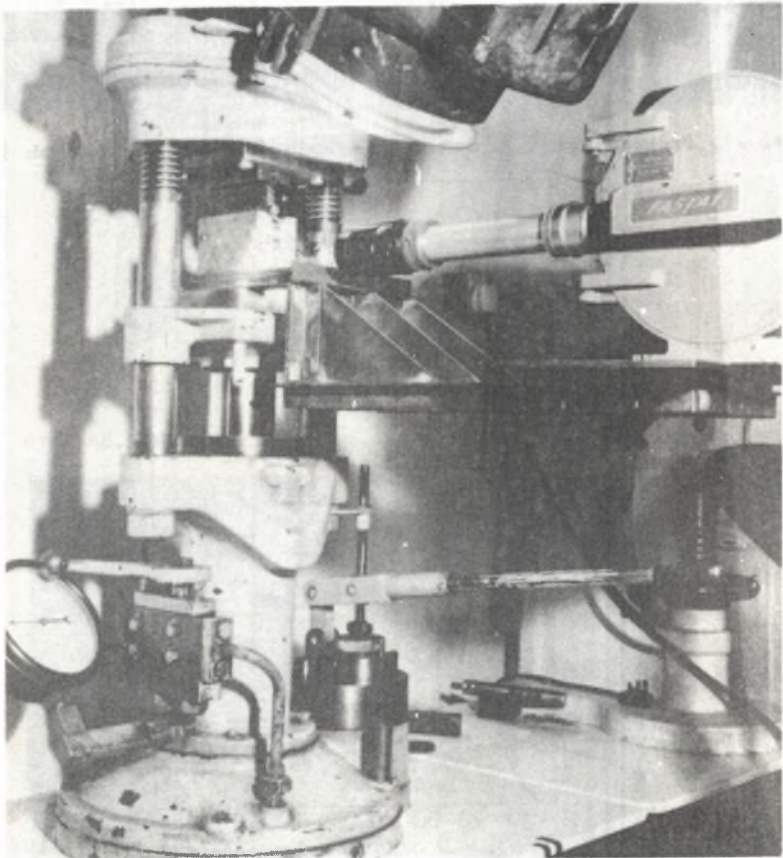


Rys. 28. Przebiegi cykli cieplnych w pierwszej warstwie spiny wielowarstwowej, wynikające z układania kolejnych warstw [57]

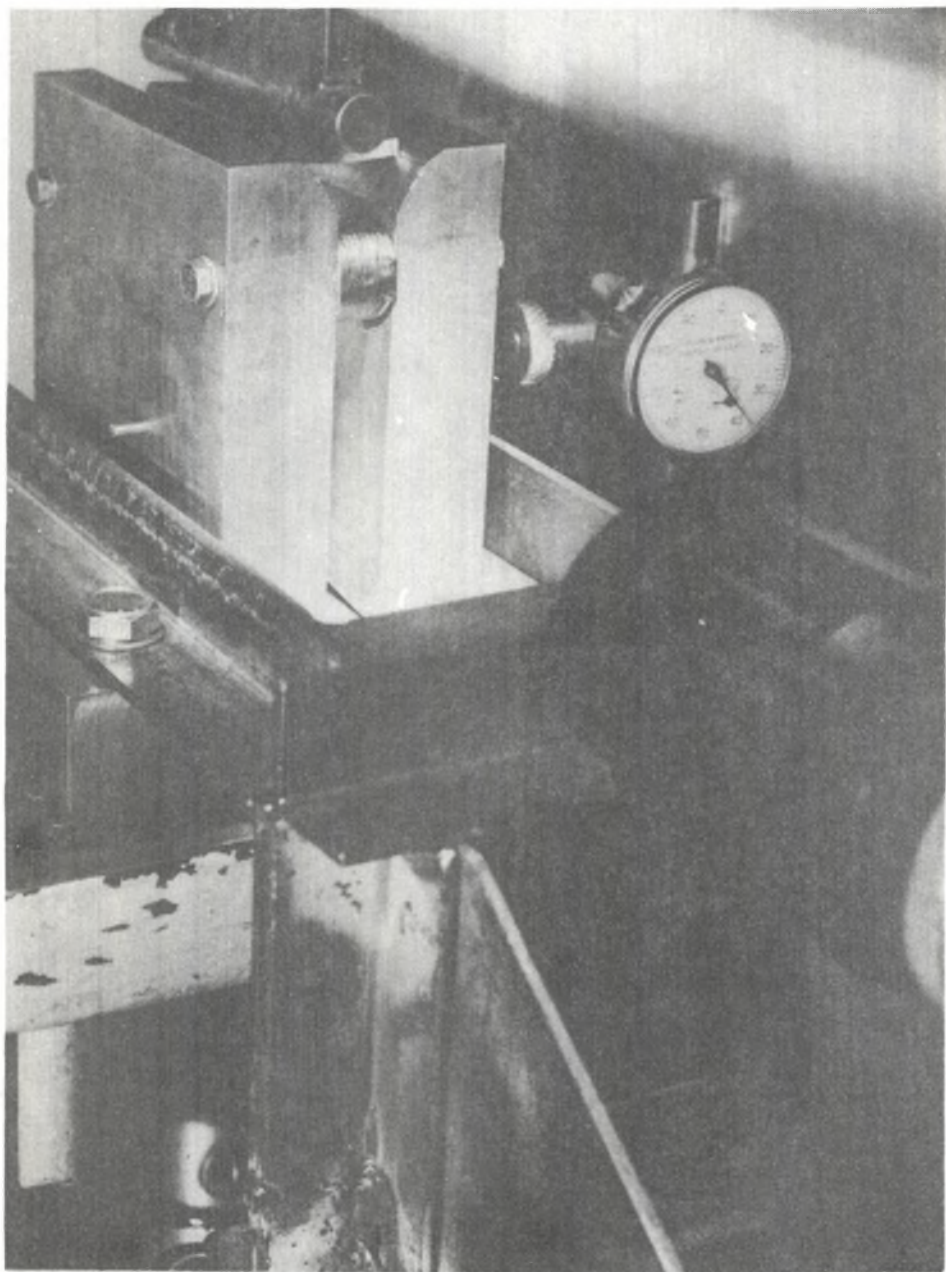


Rys. 29. Schemat stanowiska badawczego

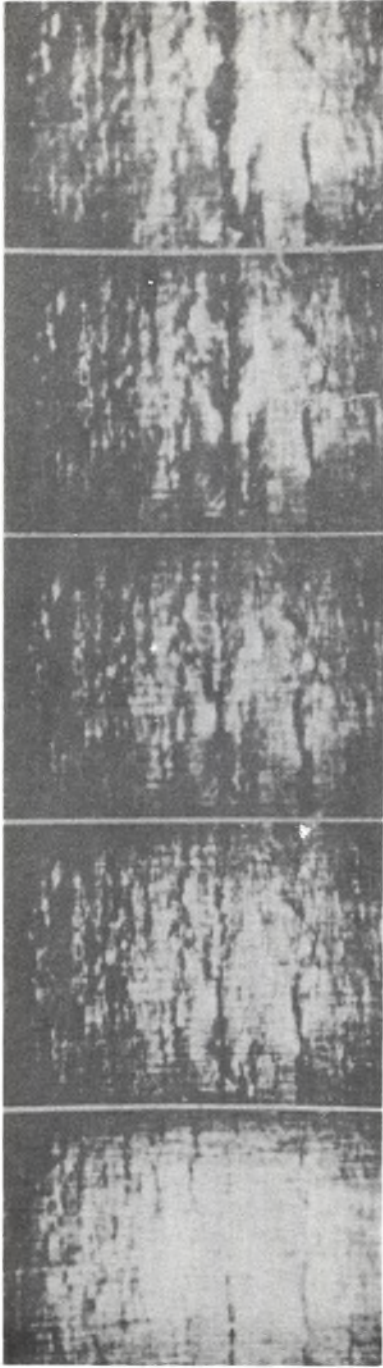
1 - trzpień zginający, 2 - próbka, 3 - matryca, 4 - lusterko ukośne, 5 -
lusterko płaskie, 6 - źródło światła, 7 - układ soczewek i tubusów, 8 -
kamera szybkofilmująca



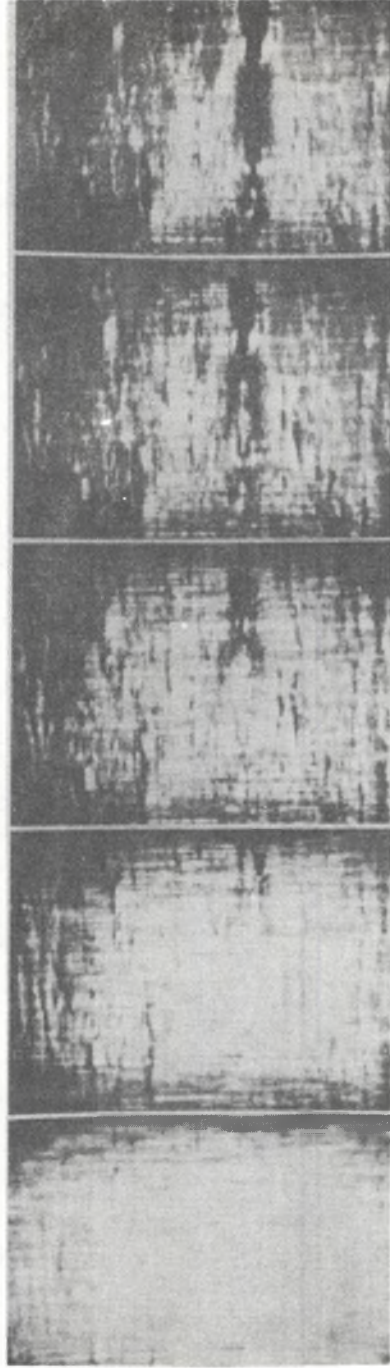
Rys. 30. Widok ogólny stanowiska badawczego do badań metodą filmowania



Rys. 31. Środkowa część rys. 30 - w powiększeniu

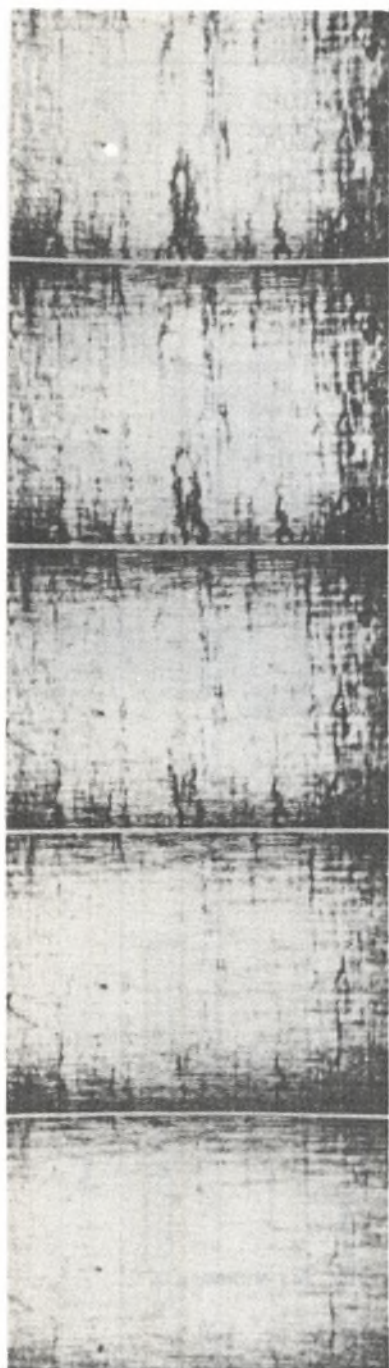


a)

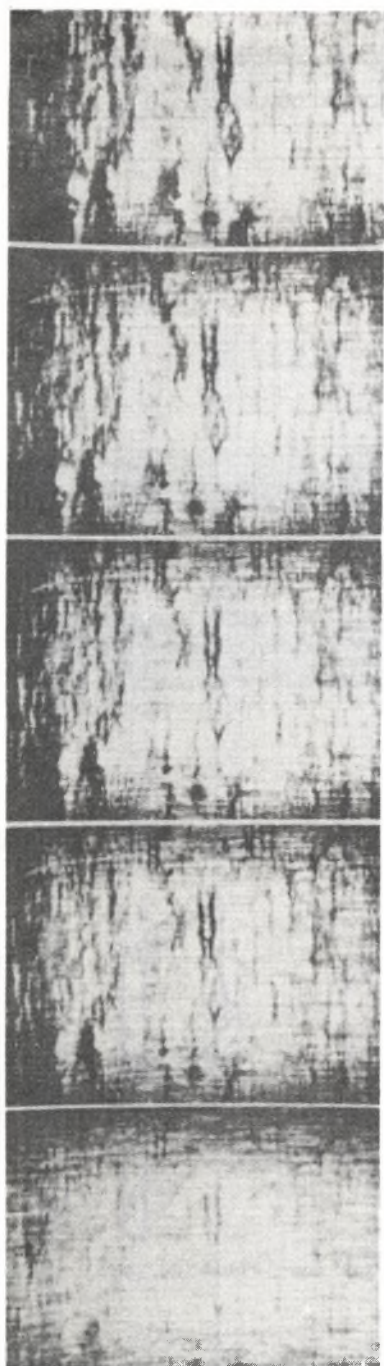


b)

Rys. 32. Etapy rozwijania pęknięć lamelarnych
a) w materiale rodzimym w próbie "wzdłużnej", b) w materiale rodzimym w próbie "poprzecznej" (każda fotografia przedstawia obszar 3x4 mm)

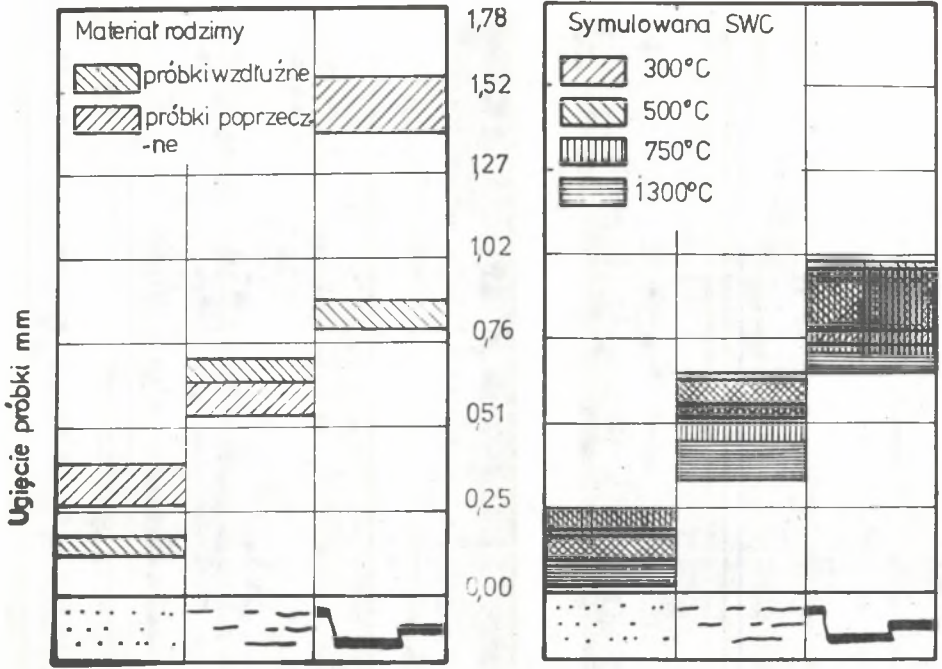


a)

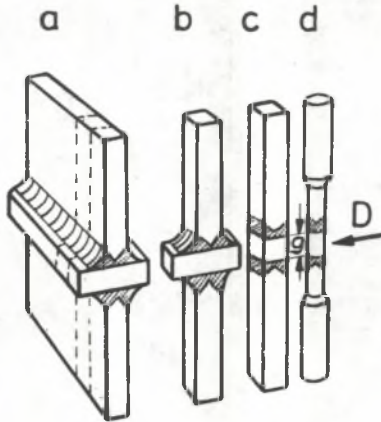


b)

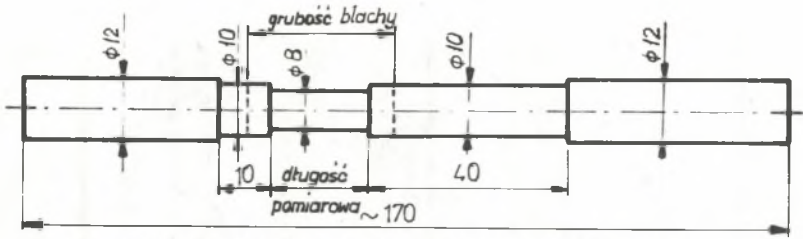
Rys. 33. Etapy rozwijania pęknięć lamelarnych
a) w materiale poddanym cyklowi symulowania 1300°C, b) w materiale poddanym cyklowi symulowania 500°C (Każ-
da fotografia przedstawia obszar 3x4 mm)



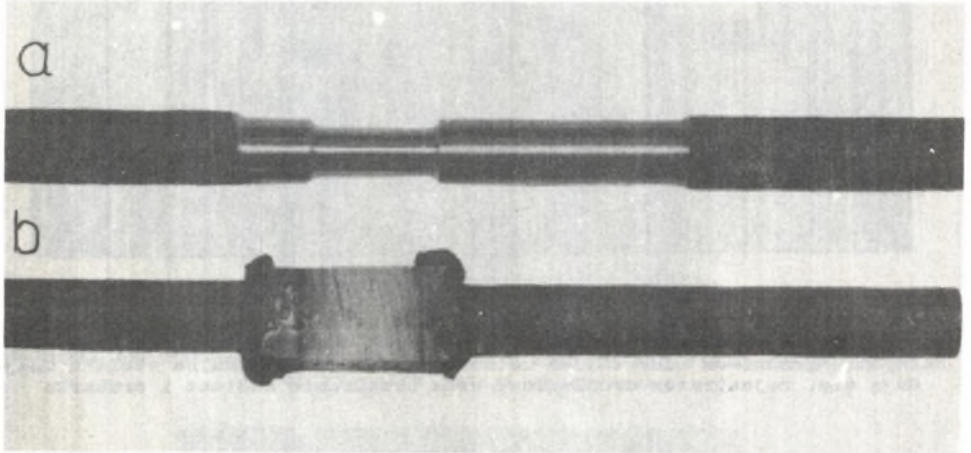
Rys. 34. Inicjowanie i rozprzestrzenianie pękania lamelnego w zależności od wielkości odkształcenia materiału



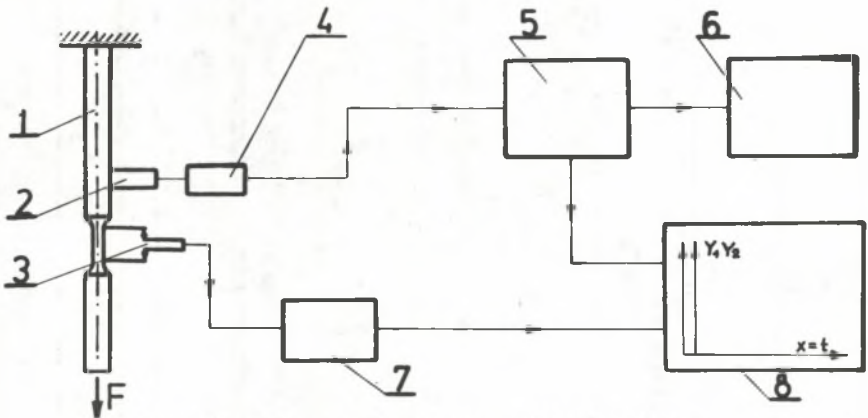
Rys. 35. Próbką do próby "Z" oraz etapy jej wykonania



Rys. 36. Próbką do badań metodą emisji akustycznej

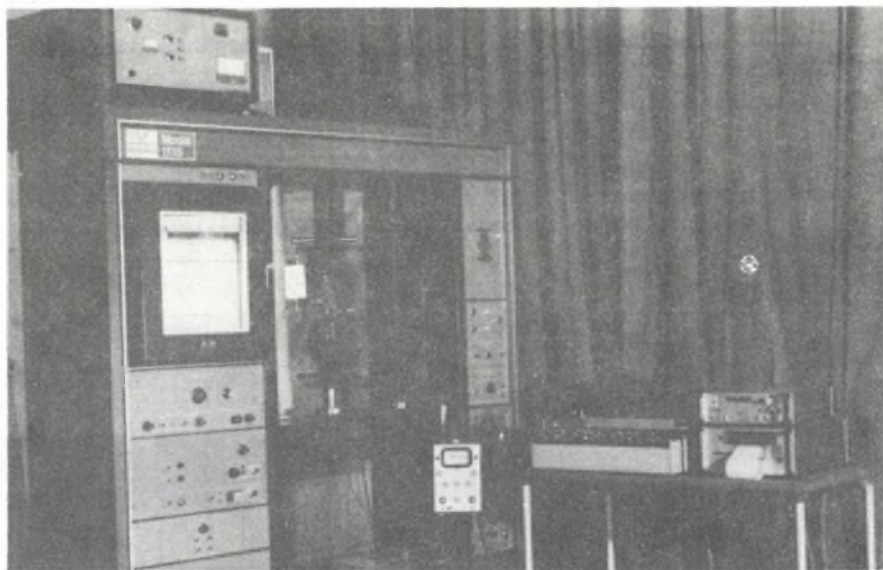


Rys. 37. Próbką do badań metodą emisji akustycznej (a) oraz półfabrykat po grzewaniu tarciovym (b), zastosowany do jej wykonania

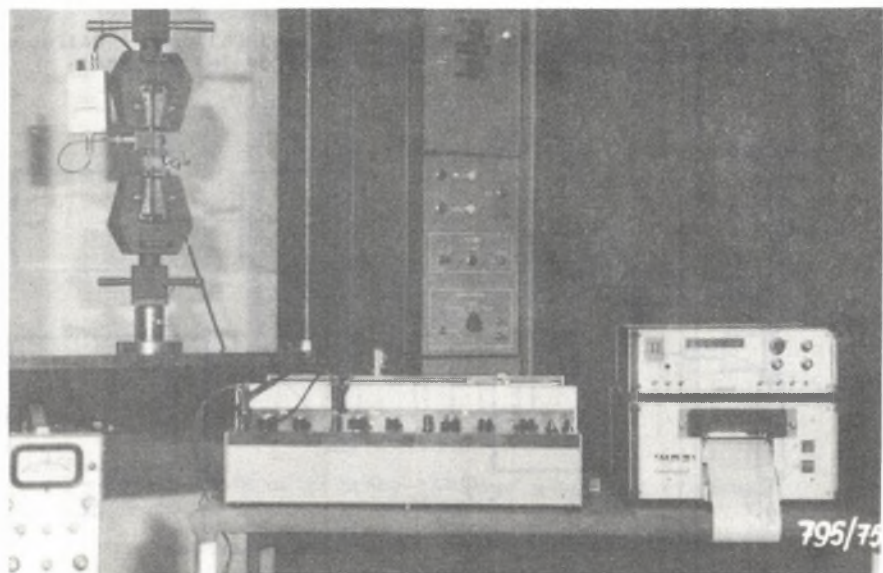


Rys. 38. Schemat ideowy stanowiska badawczego

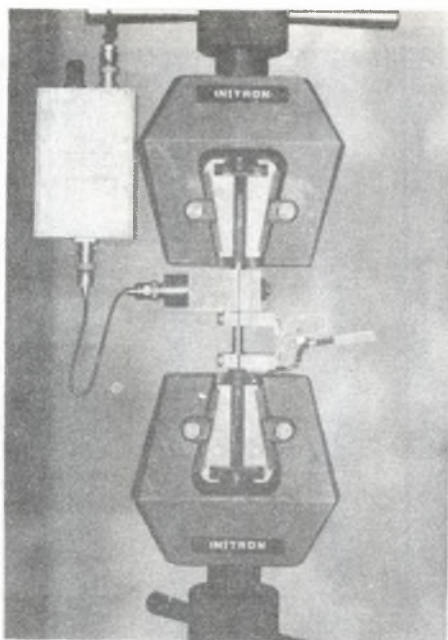
- 1) próbka, 2) czujnik emisji akustycznej, 3) czujnik odkształceń, 4) przedwzmacniacz emisji akustycznej, 5) audiomat P, 6) drukarka, 7) wzmacniacz odkształceń, 8) rejestrator dwukanałowy X-Y₁Y₂



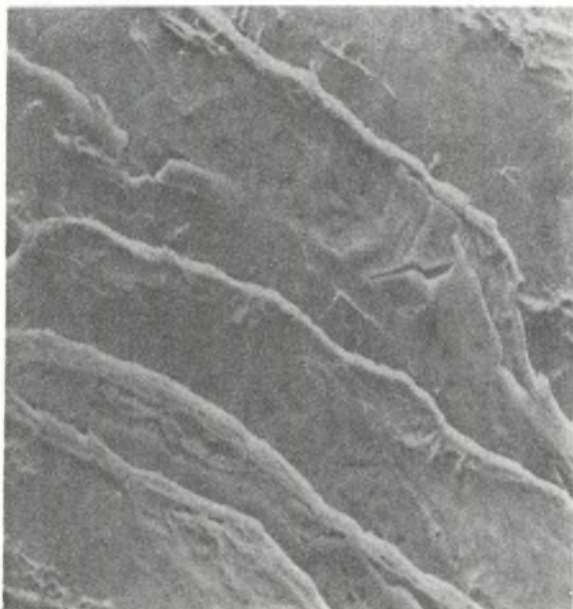
Rys. 39. Fotografia stanowiska badawczego: do próbki zamocowanej w szczękach maszyny do rozciągania podłączony jest z lewej strony czujnik emisji akustycznej z przedwzmacniaczem oraz z prawej - czujnik odkształceń lokalnych. Wzmacniacz odkształceń ustawiony jest na stojaku. Na stoliku znajdują się: rejestrator dwukanałowy oraz urządzenie Audimat i drukarka



Rys. 40. Powiększony fragment fotografii zamieszczonej na rys. 39

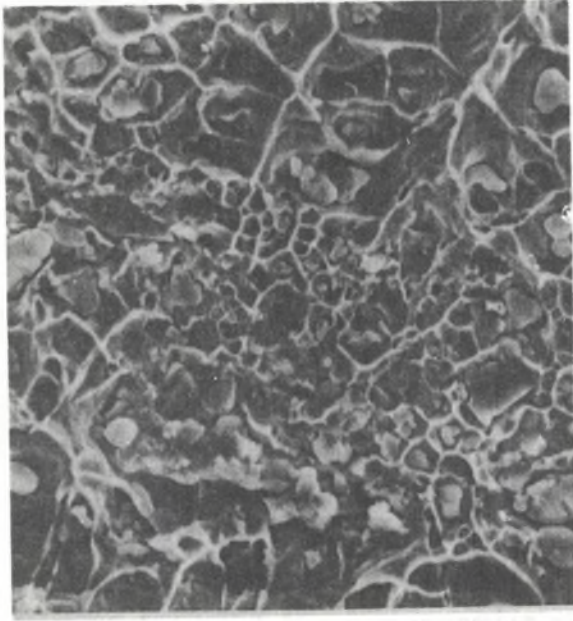


Rys. 41. Próbka zamocowana w szczękach maszyny do rozciągania wraz z podłączonymi czujnikami emisji akustycznej i odkształceń. Widoczny przedwzmacniacz sygnałów emisji akustycznej

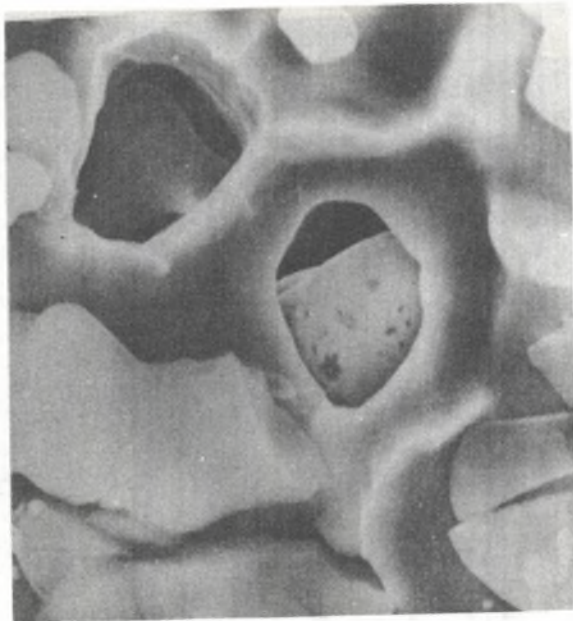


Rys. 42. Duże wtrącenia niemetaliczne pokrywające cały przełom pęknięcia lamelarnego (mikroskop skaningowy, 1000x)

a)

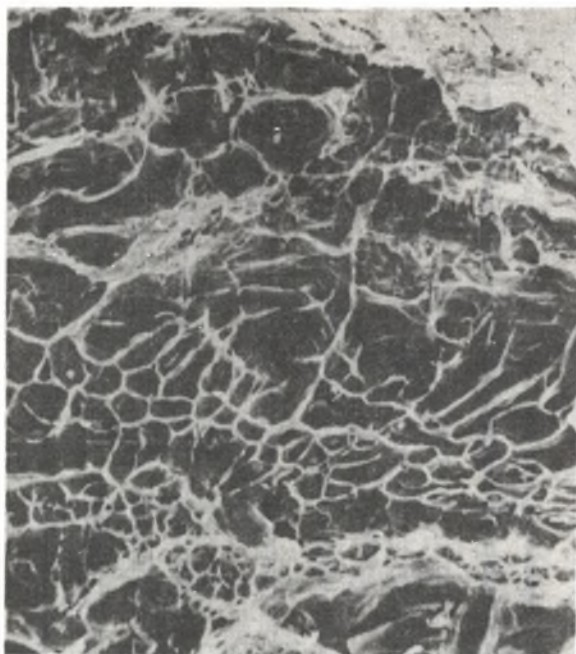


b)

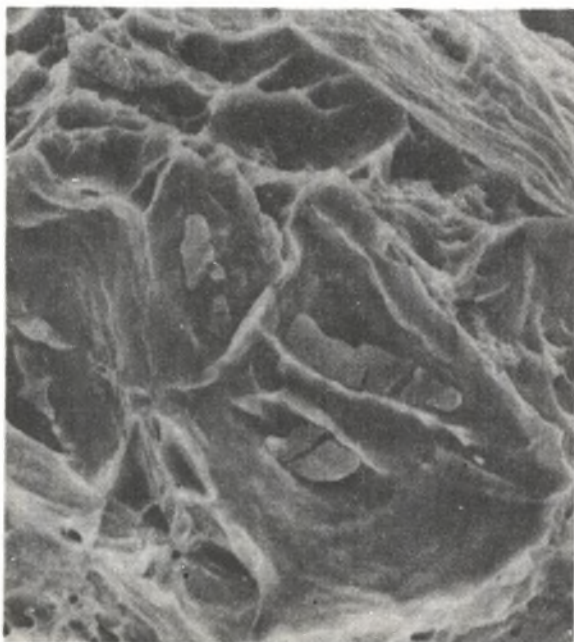


Rys. 43. Skupisko wtrąceń kulistych na przełomie pęknięcia lamelarnego (mikroskop skaningowy a - 500x, b - 5000x)

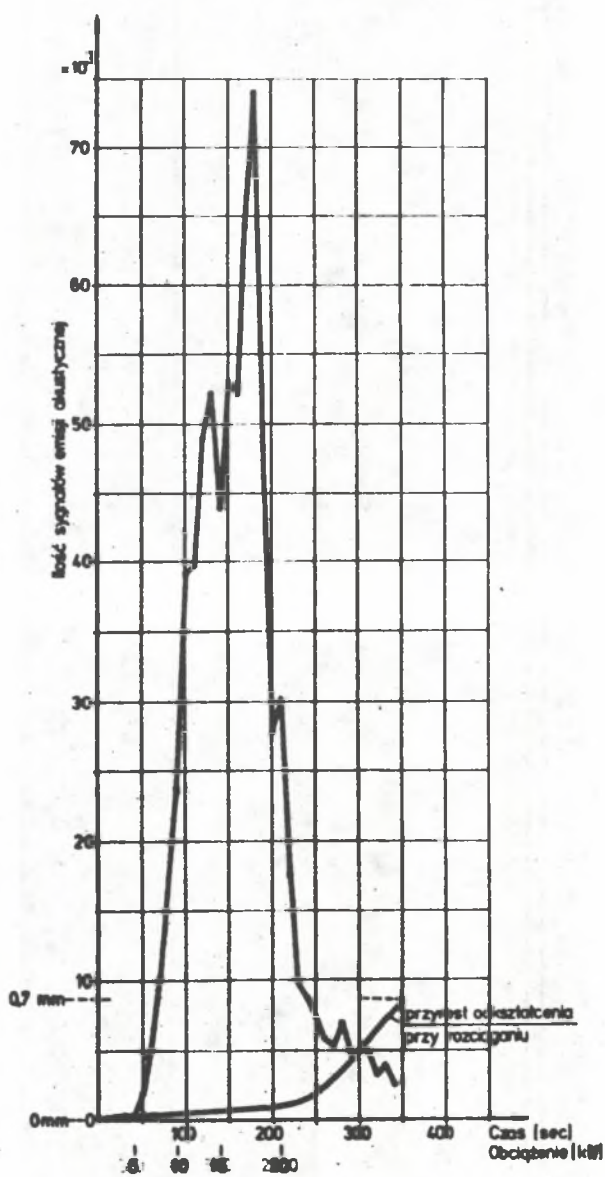
a)



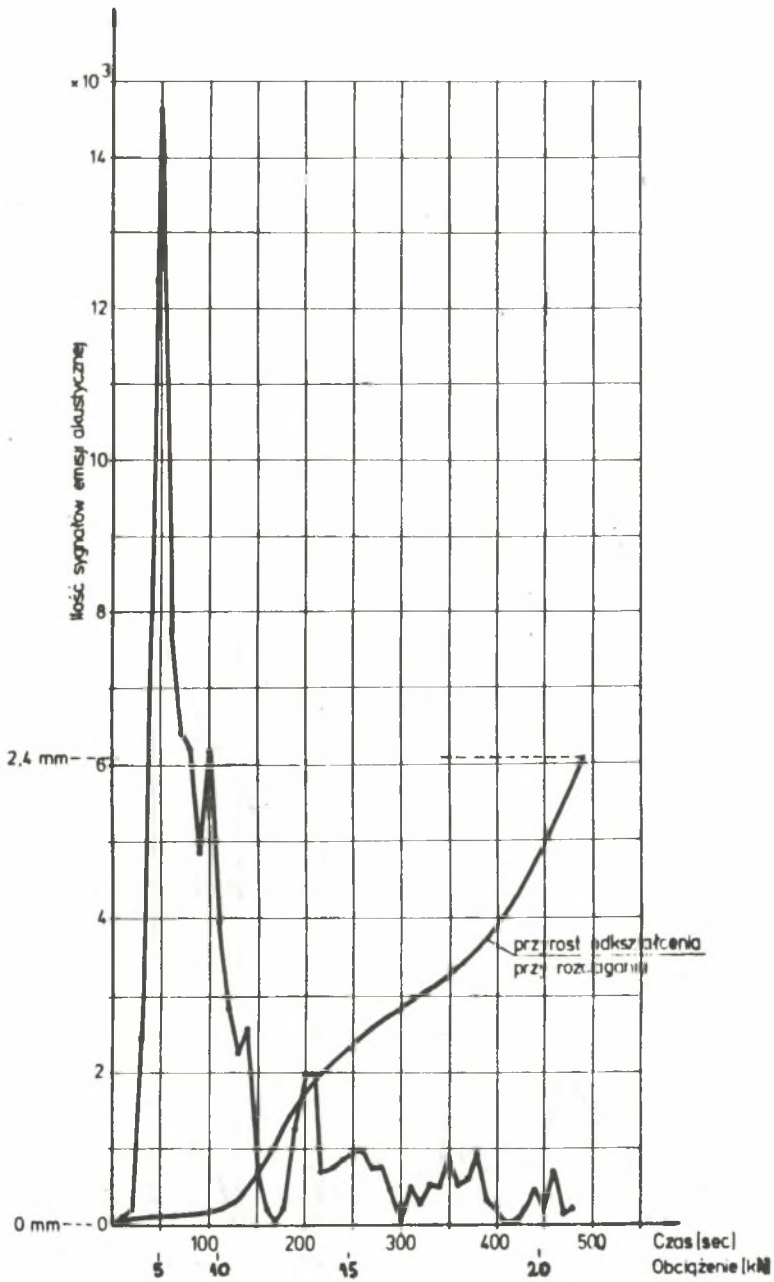
b)



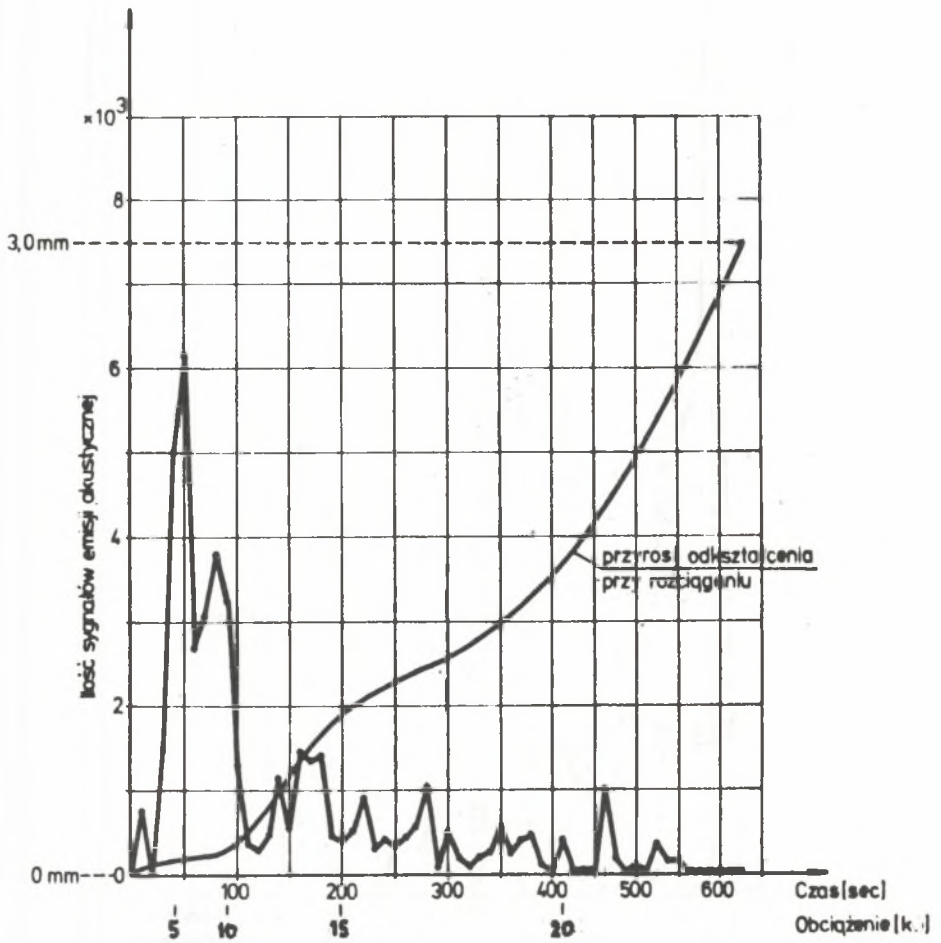
Rys. 44. Rozproszone wtrącenia niemetaliczne, niedużych wymiarów na przekroju pęknięcia lamelarnego. (Mikroskop skaningowy a - 500x, b - 3000x)



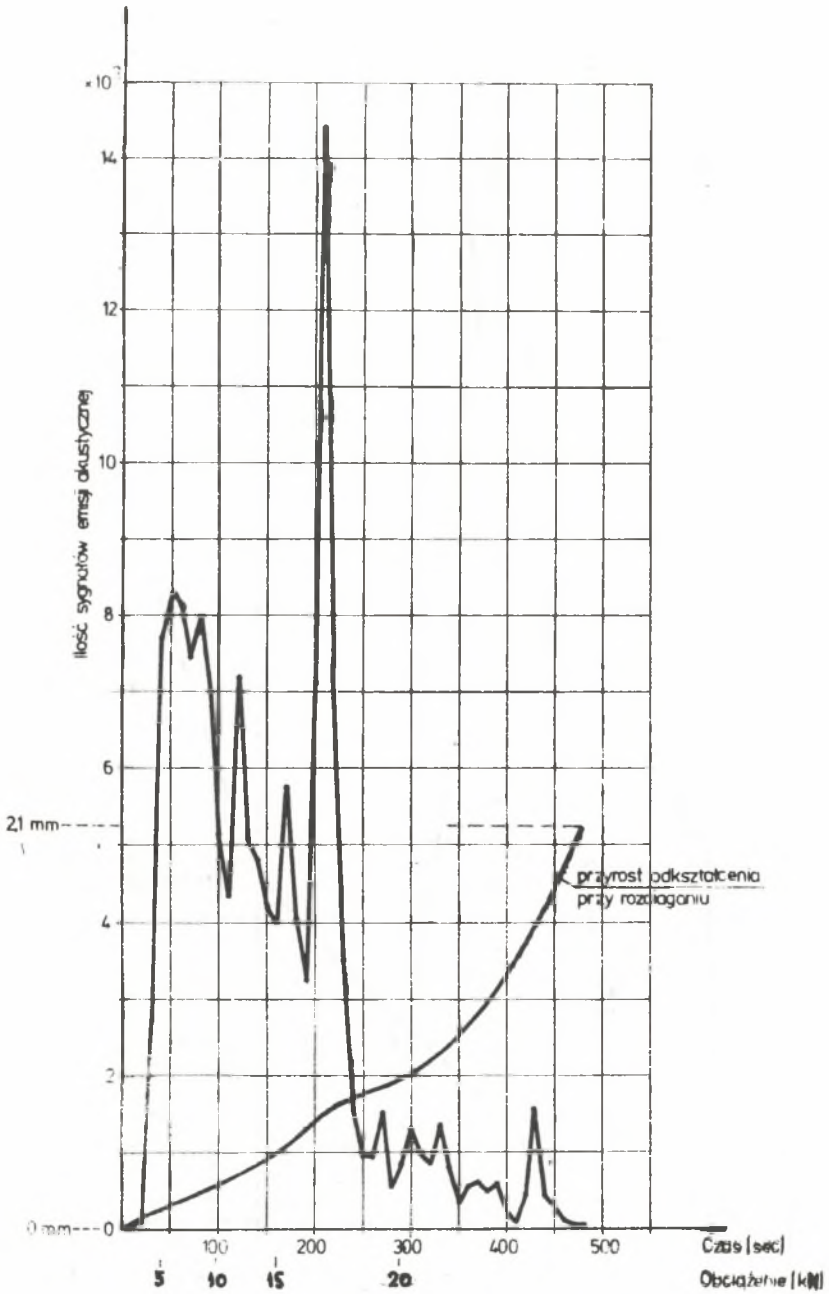
Rys. 45. Przebieg sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu i obciążenia. Stal nr 2



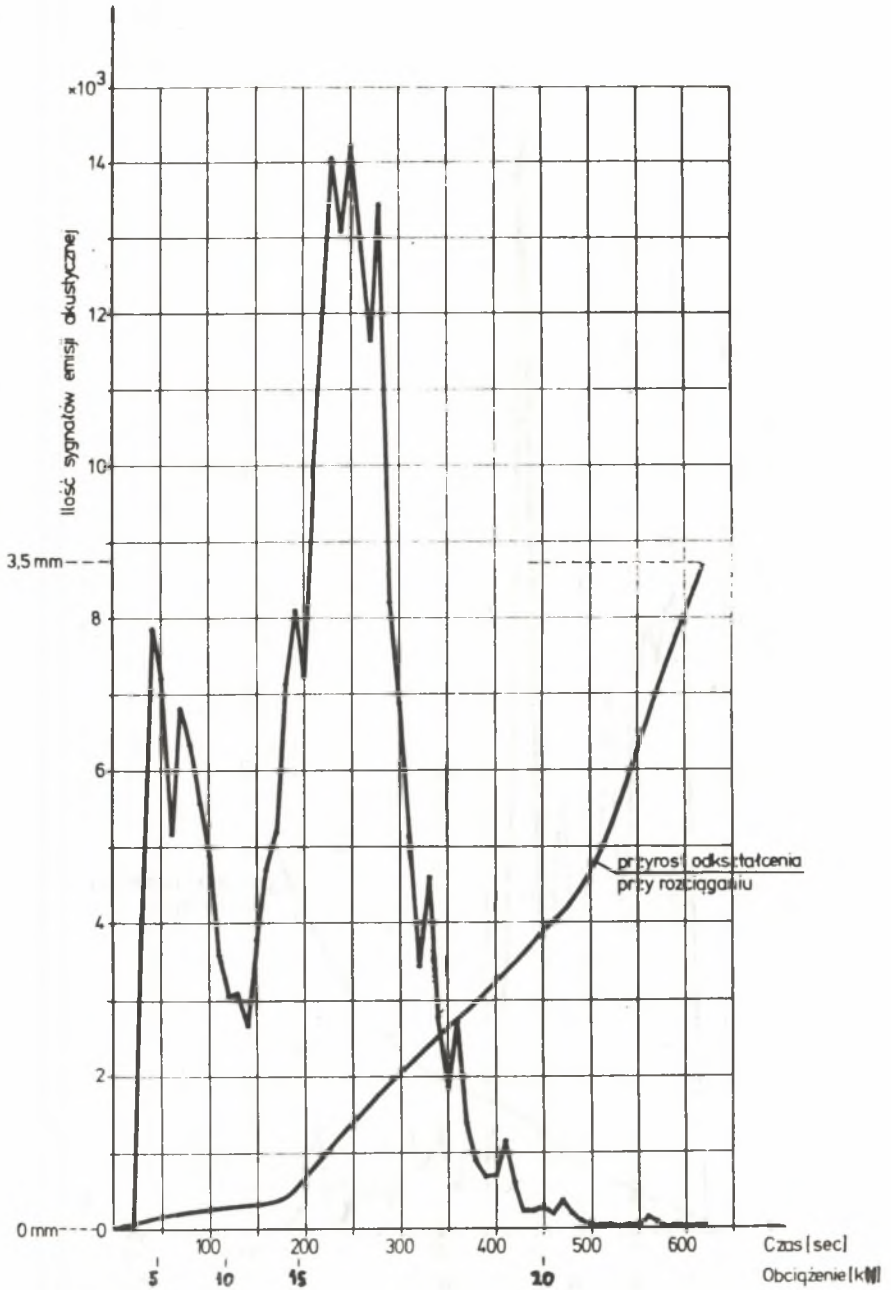
Rys. 46. Przebieg sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu i obciążenia, Stal nr 3



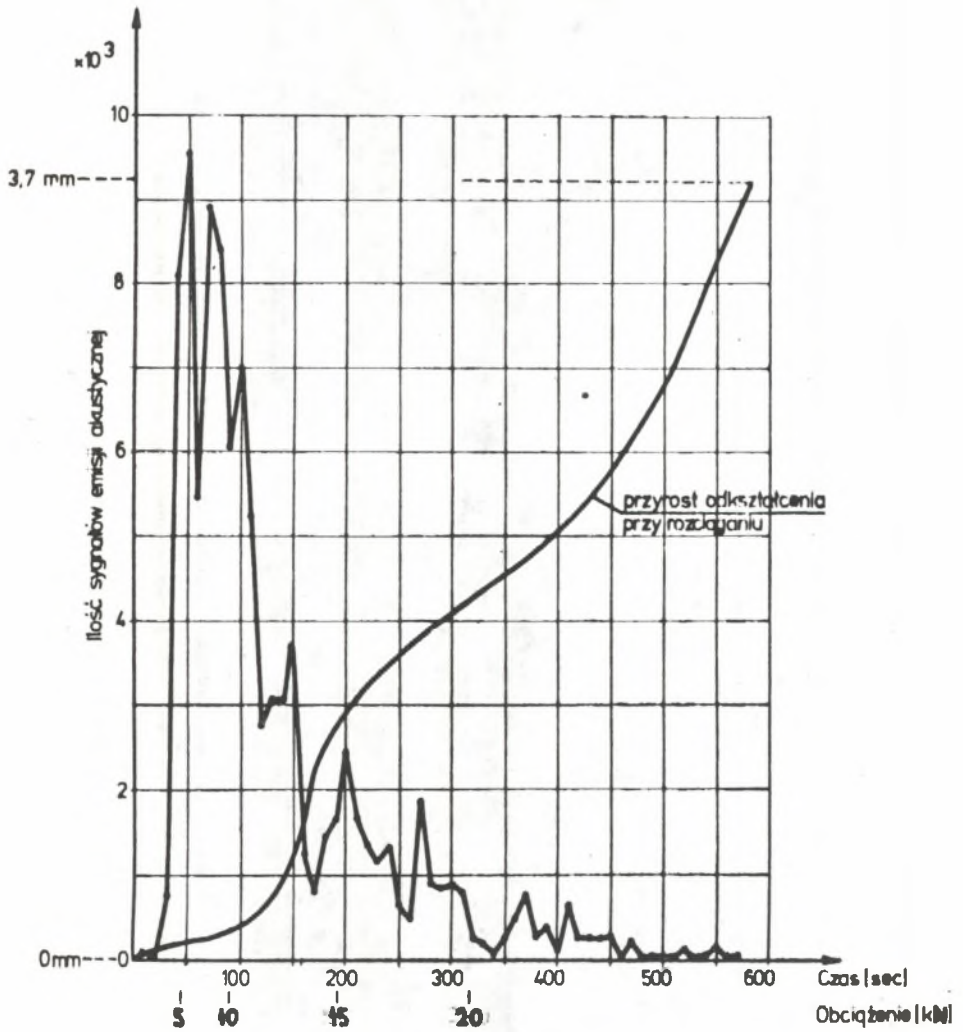
Rys. 47. Przebieg sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu i obciążenia. Stal nr 4



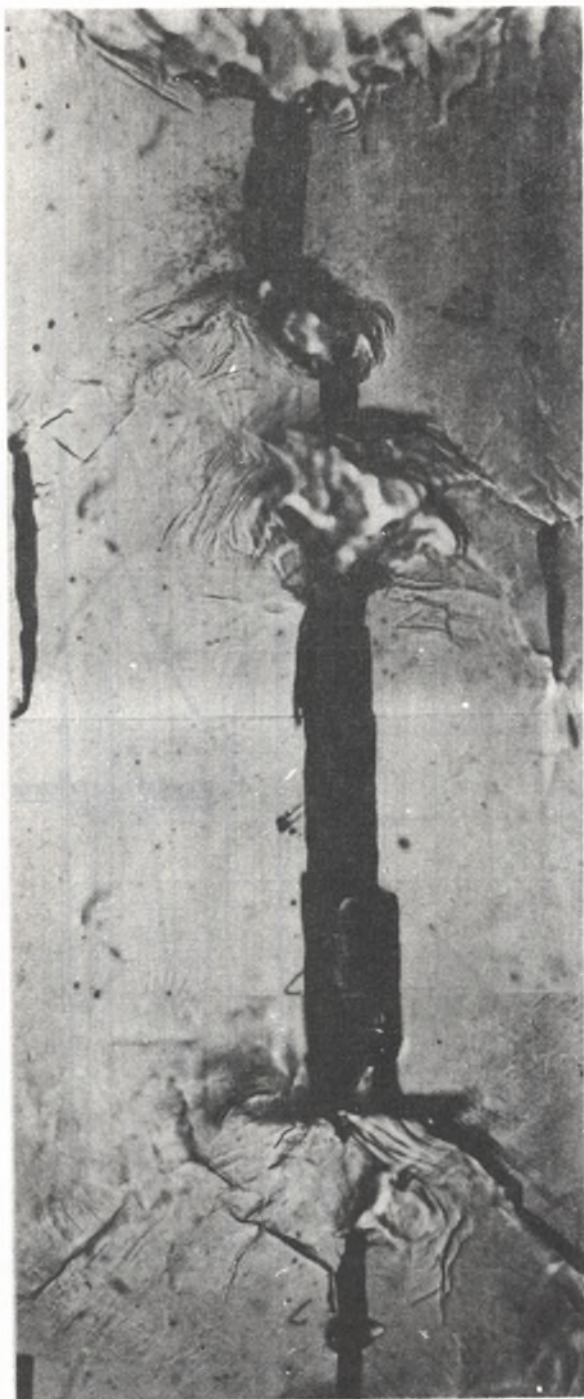
Rys. 48. Przebieg sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu i obciążenia, Stal nr 5



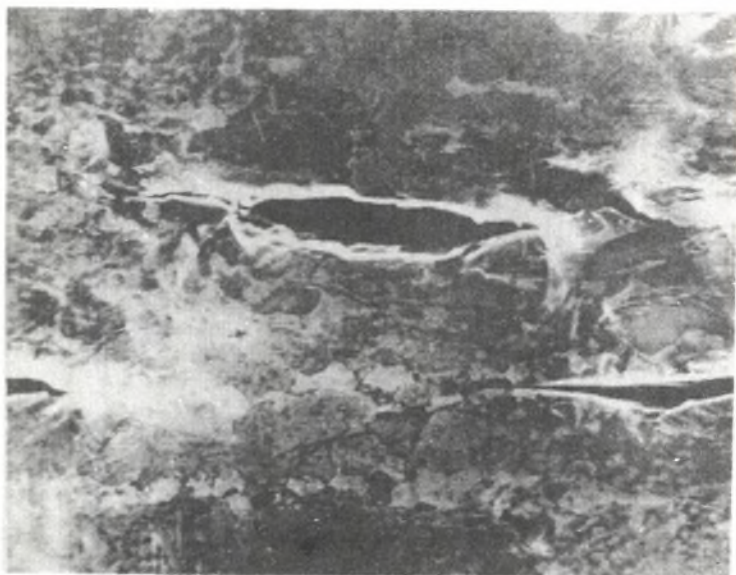
Rys. 49. Przebieg sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu i obciążenia. Stal nr 6



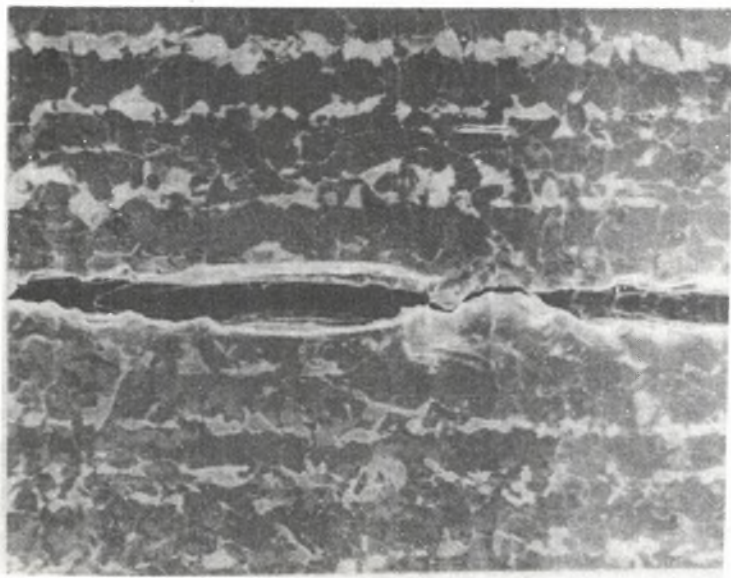
Rys. 50. Przebieg sygnałów emisji akustycznej oraz odkształceń lokalnych w funkcji czasu i obciążenia. Stal nr 7



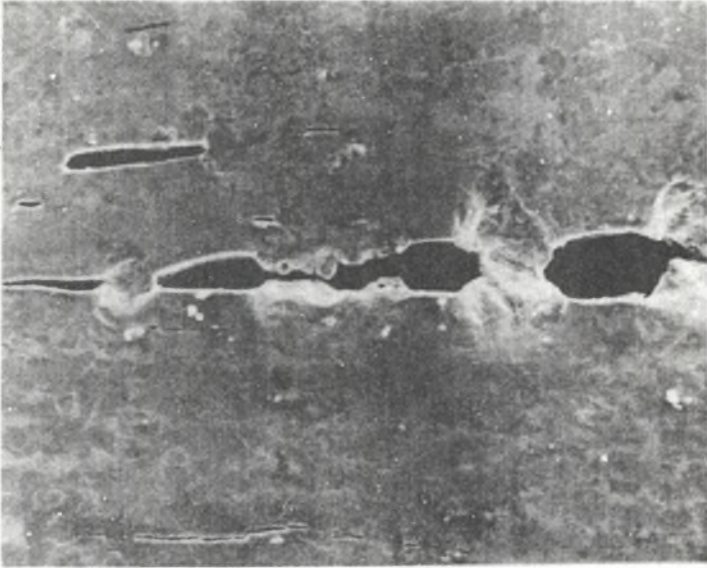
Rys. 51. Inicjowanie i rozprzestrzenianie pęknięć lamelarnych. Mikroskop optyczny, powiększenie 1000x. Powierzchnia polerowana przed przyłożeniem obciążenia odkształcającego, nietrawiona



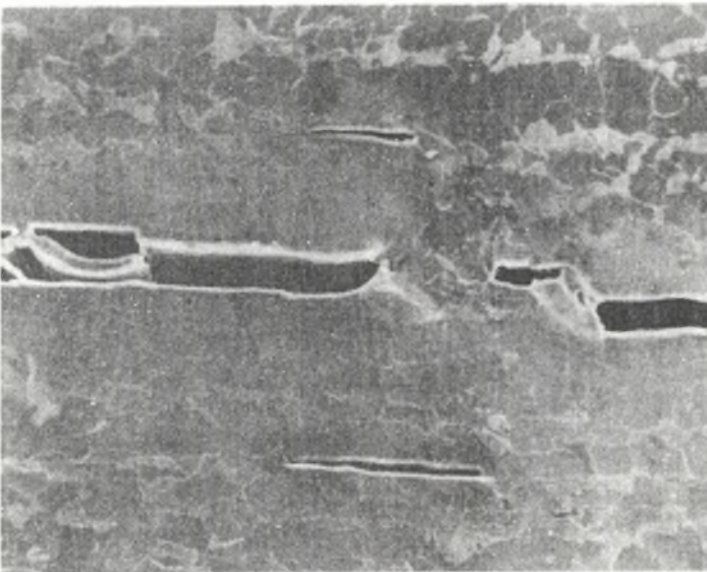
Rys. 52. Mikropęknięcia wokół wtrąceń niemetalicznych. Powierzchnia obserwowana \parallel do kierunku walcowania i \perp do powierzchni blachy, polerowana przed przyłożeniem obciążenia odkształcającego i trawiona nitałem po odkształceniu. Mikr. skaningowy, pow. 350x



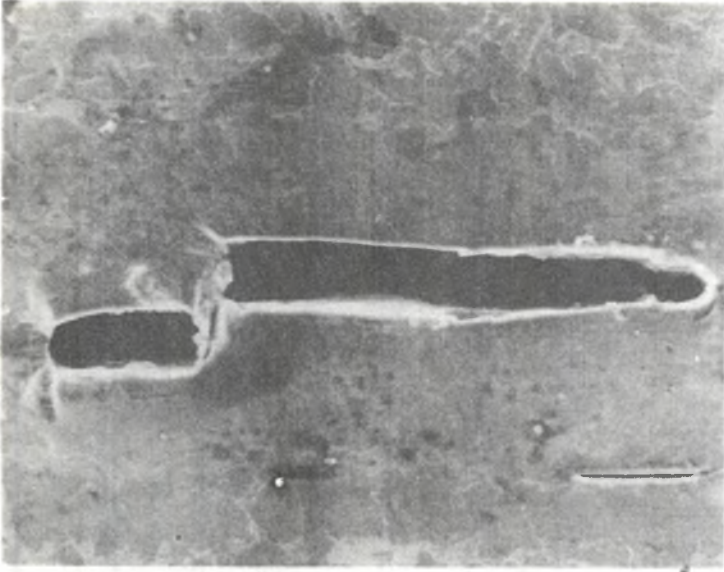
Rys. 53. Łączenie dwóch mikropęknięć utworzonych wokół wtrąceń niemetalicznych. Uwagi jak dla rys. 52. Mikr. skaningowy, pow. 300x



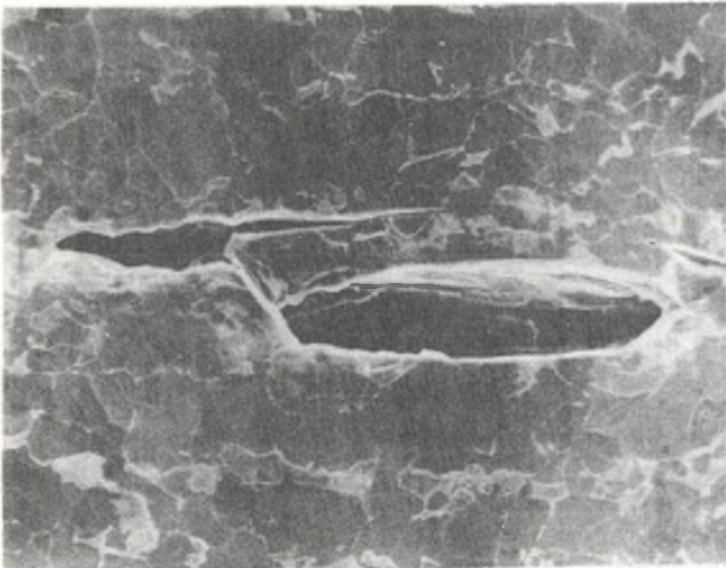
Rys. 54. Tworzenie tarasu pęknięcia lamelarnego. Powierzchnia obserwowana \perp do kierunku walcowania i \perp do powierzchni blachy, polerowana przed przyłożeniem obciążenia odkształcającego i trawiona nitałem po odkształceniu. Mikr. skan., pow. 250x



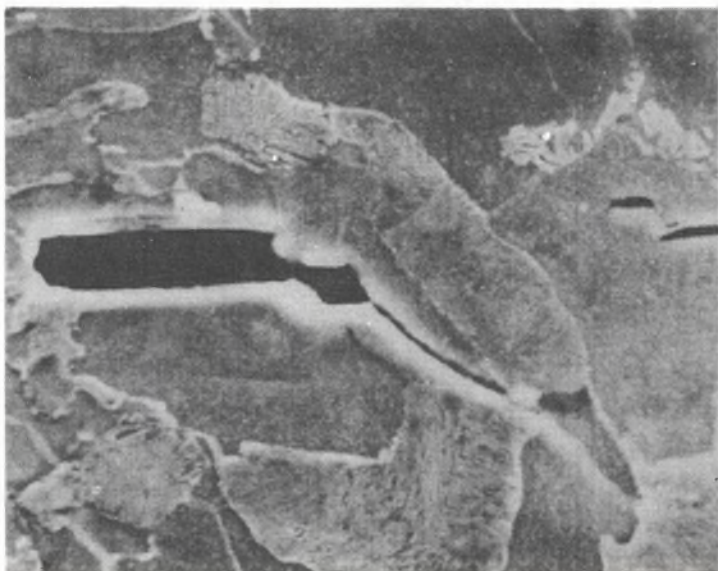
Rys. 55. Tworzenie tarasu pęknięcia lamelarnego. Uwagi jak dla rys. 54. Mikr. skan., pow. 400x



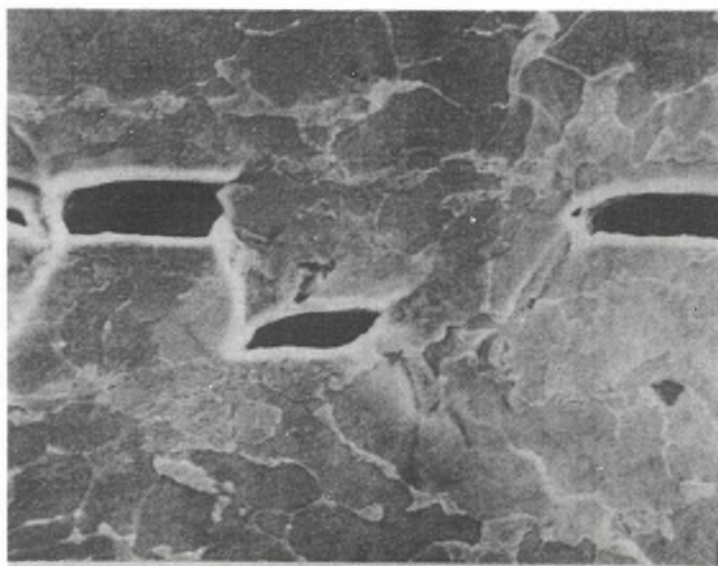
Rys. 56. Ścinanie materiału "czystego" pomiędzy dwoma mikropeknięciami ułożonymi na różnych poziomach. Uwagi jak dla rys. 54. Mikr. skan., pow. 400x



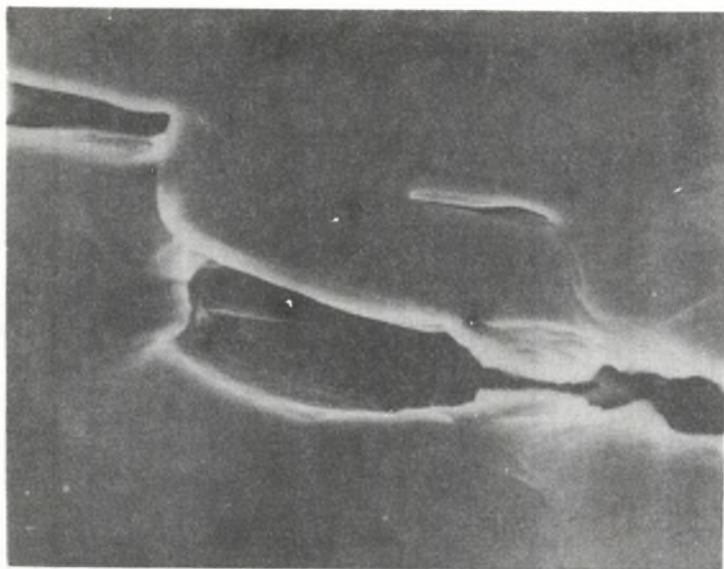
Rys. 57. Ścinanie materiału "czystego" pomiędzy dwoma mikropeknięciami ułożonymi na różnych poziomach. Uwagi jak dla rys. 52. Mikr. skan. pow. 300x



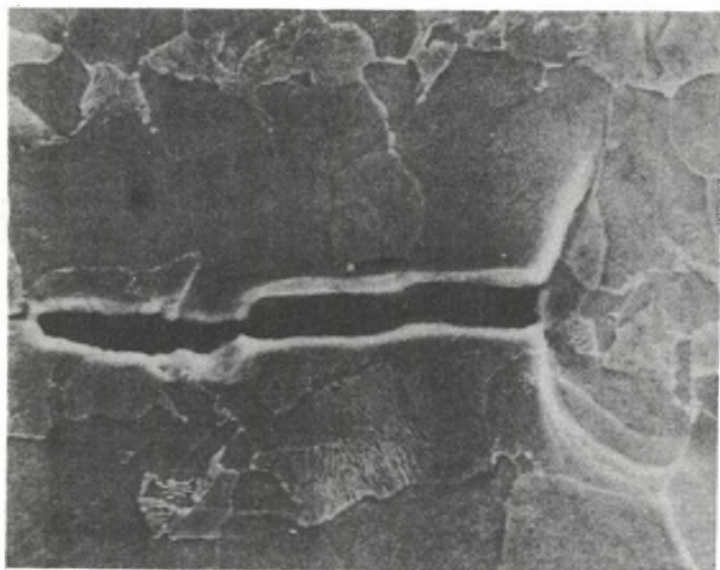
Rys. 58. Inicjowanie uskołu począwszy od końca jednego tarasu. Uwagi jak dla rys. 54. Mikr. skan., pow. 1800x



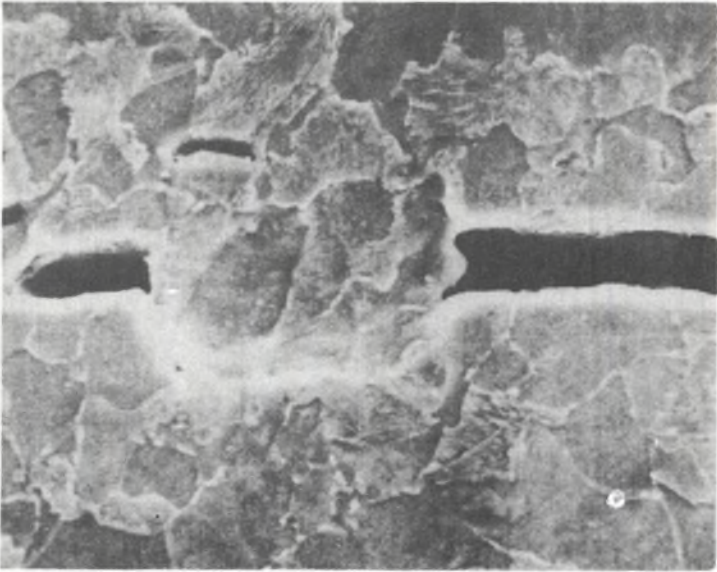
Rys. 59. Inicjowanie uskoków pomiędzy kilkoma mikropełnięciami. Uwagi jak dla rys. 54. Mikr. skan., pow. 800x



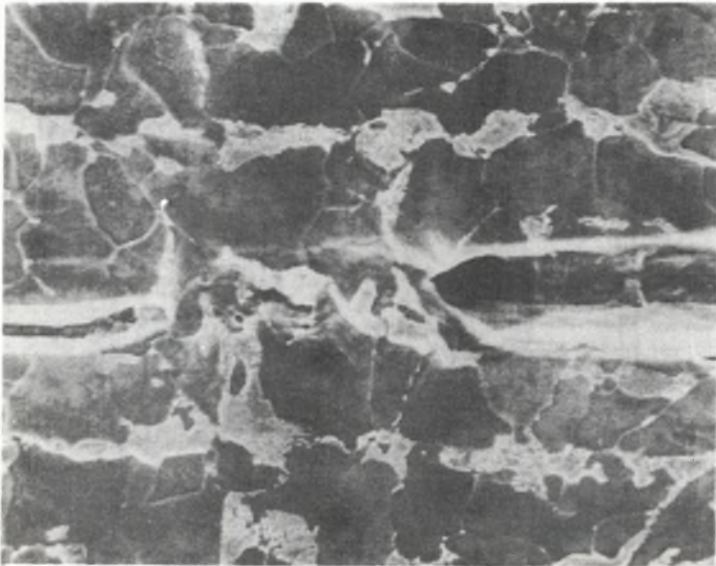
Rys. 60. Łączenie dwóch mikropęknięć oraz tworzenie uskoku pomiędzy dwoma mikropęknięciami. Powierzchnia obserwowana \perp do kierunku walcowania i \perp do powierzchni blachy, polerowana przed przyłożeniem obciążenia odkształcającego, niestrawiona. Mikr. skan., pow. 1500x



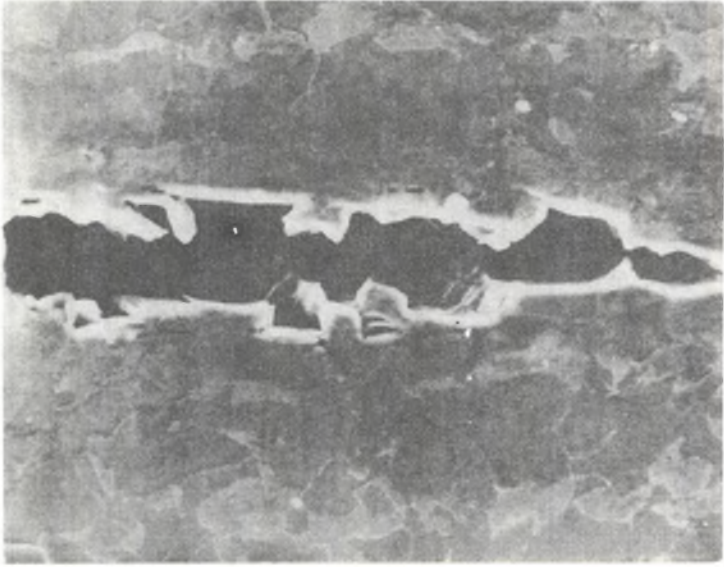
Rys. 61. Fragment tarasu zatrzymanego przez obszar odkształcający się plastycznie. Uwagi jak dla rys. 54. Mikr. skan., pow. 1200x



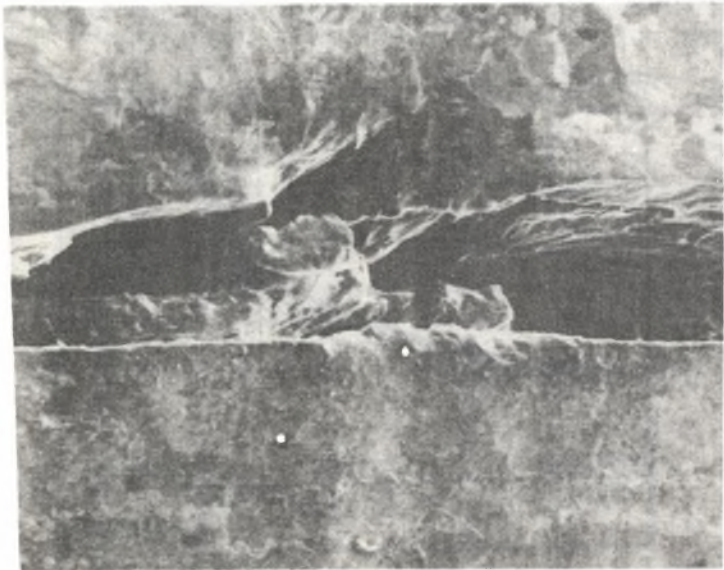
Rys. 62. Fragment tarasu. Uwagi jak dla rys. 54. Mikr. skan., pow. 1000x



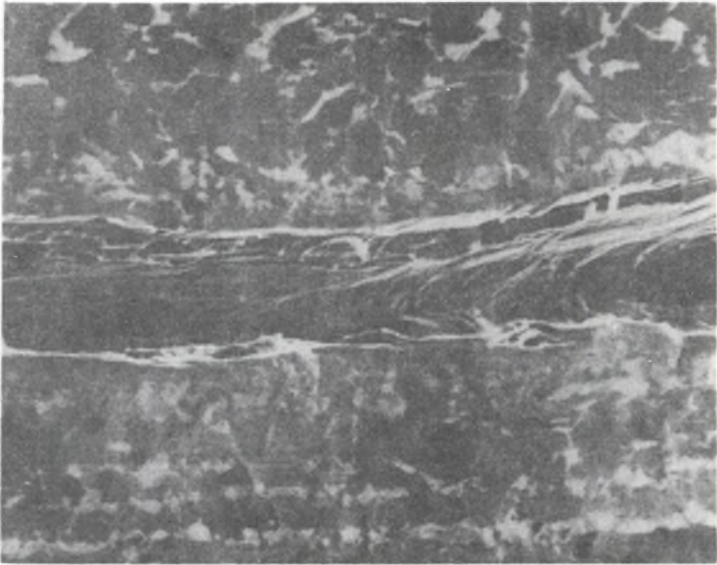
Rys. 63. Fragment tarasu. Uwagi jak dla rys. 52. Mikr. skan., pow. 800x



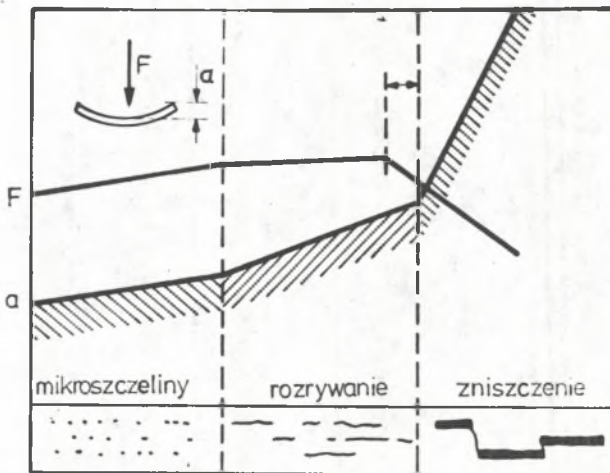
Rys. 64. Otwarte pęknięcie lamelarne. Uwagi jak dla rys. 54. Mikr. skan.,
pow. 700x



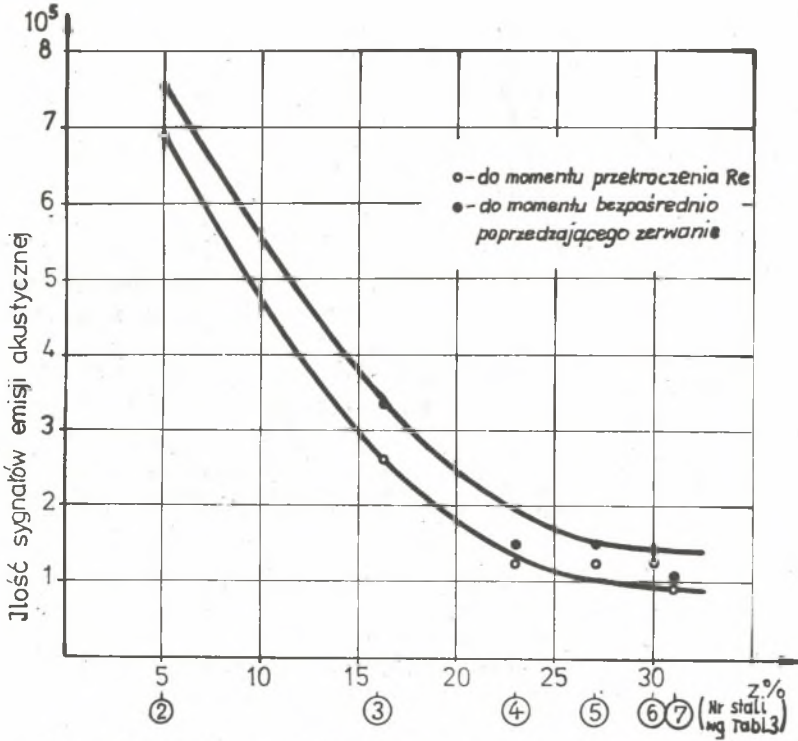
Rys. 65. Fragment otwartego pęknięcia lamelarnego. Uwagi jak dla rys. 52.
Mikr. skan., pow. 300x



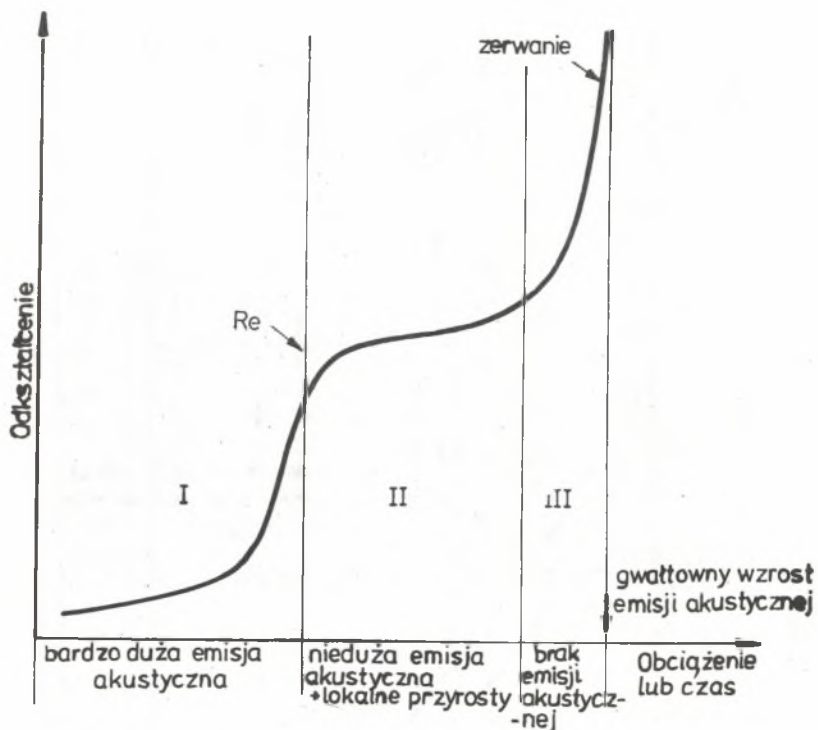
Rys. 66. Fragment otwartego pęknięcia lamelnego. Uwagi jak dla rys. 52.
Mikr. skan., pow. 300x



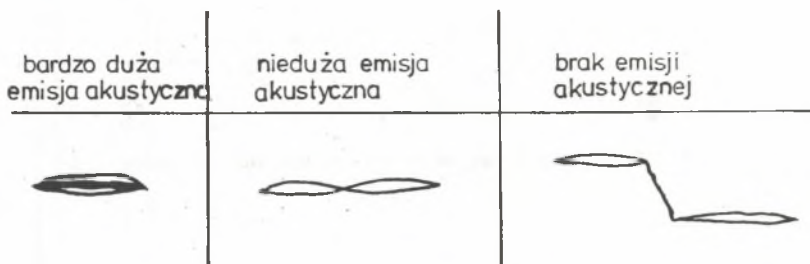
Rys. 67. Etapy przebiegu pęknięcia lamelnego



Rys. 68. Ilość sygnałów emisji akustycznej w funkcji Z



Rys. 69. Przebieg przyrostu wydłużenia lokalnego przy jednostajnym rozciąganiu blachy o pełnej grubości oraz zmiany natężenia emisji akustycznej towarzyszące temu przebiegowi



Rys. 70. Schemat tworzenia pęknięć lamelarnych

MECHANIZM INICJOWANIA I ROZPRZESTRZENIANIA PĘKNIĘĆ LAMELARNYCH

Streszczenie

W konstrukcjach spawanych, w których stosowane są elementy walcowane, odkształcane w kierunku ich grubości w efekcie samego tylko procesu spawania lub też pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych, tworzą się pęknięcia zwane lamelarnymi. Podstawową przyczyną powstawania pęknięć lamelarnych jest niska ciągliwość blach stalowych w kierunku ich grubości, wynikająca głównie z obecności zbyt dużej ilości wtrąceń niemetalicznych w stali.

Omówiono czynniki warunkujące powstawanie pęknięć lamelarnych, związane z ukształtowaniem złącza spawanego, z procesem spawania oraz z własnościami spawanej stali. Zestawiono dostępne metody oceny skłonności stali do pęknięcia lamelarnego. Dokonano przeglądu teorii mechanizmu tworzenia pęknięć lamelarnych.

Ponieważ żadna z literaturowych teorii mechanizmu pęknięcia lamelarnego nie została poparta badaniami, podjęto próbę określenia tego mechanizmu w sposób badawczy. W tym celu zastosowano dwie metody: szybkiego filmowania oraz emisji akustycznej. Stosowanie obydwu metod wymagało opracowania specjalnych próbek oraz specjalnych oprzyrządowań. Wyniki badań emisji akustycznej kontrolowano w oparciu o badania mikroskopowe prowadzone przy użyciu mikroskopii optycznej i skaningowej.

Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu siedmiu gatunków stali produkcji krajowej i zagranicznej, charakteryzujących się zróżnicowaną skłonnością do pęknięcia lamelarnego. Przeprowadzono analizę przyczyn zróżnicowanej skłonności badanych stali do tworzenia pęknięć lamelarnych.

Wykonane badania pozwoliły na przedstawienie w sposób jakościowy i ilościowy mechanizmu inicjowania i rozprzestrzeniania pęknięć lamelarnych w blachach stalowych. Pozwoliły również na ustalenie warunków stosowania metody emisji akustycznej do wykrywania pęknięć lamelarnych w złączach spawanych.

МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЯМЕЛЯРНЫХ ТРЕЩИН

Резюме

В сварных конструкциях, в которых используются прокатанные элементы, деформированные в направлении их толщины, в результате самого только сварочного процесса или под воздействием эксплуатационных нагрузок, образуются трещины, называемые лямеллярными. Основной причиной возникновения лямеллярных трещин является низкая вязкость стальных листов в направлении их толщины, вызванная, главным образом, присутствием чрезмерного количества неметаллических включений в стали.

Рассмотрены факторы, обуславливающие возникновение лямеллярных трещин, связанные с формированием сварного шва, сварочным процессом, а также со свойствами свариваемой стали. Сведены доступные методы оценки склонности к образованию лямеллярных трещин.

В связи с тем, что литературная теория механизма образования лямеллярных трещин не была подтверждена исследовательскими работами, была предпринята попытка определения этого механизма научным методом. Для этой цели применены два метода: скоростная фотосъемка и акустическая эмиссия. Применение этих двух методов требовало разработки специальных образцов, а также специального оборудования. Результаты исследований акустической эмиссии контролировано на основе микроскопических исследований, проводимых при помощи оптической и сканирующей микроскопии.

Исследования производились на семи сортах стали отечественного и зарубежного производства, характеризующихся различной склонностью к образованию лямеллярных трещин. Произведен анализ причин различной склонности испытываемых сталей к образованию лямеллярных трещин.

Произведенные исследовательские работы позволили представить качественным и количественным образом механизм инициирования и распространения лямеллярных трещин в стальных листах. Разрешили также уточнить условия применения акустической эмиссии для обнаруживания лямеллярных трещин в сварных швах.

A STUDY OF THE MECHANISM OF LAMELLAR TEARING INITIATION AND PROPAGATION

Summary

In many welded structures in which hot-rolled steels were used and sufficiently high tensile strains and stresses in the thickness direction were applied the cracking called "lamellar tearing" occurs. Lamellar tearing is related to poor mechanical properties in the thickness direction; the reason of this being the high quantity of non-metallic inclusions present in steel.

The literature survey on lamellar tearing has been carried out. Factors associated with the type of welded joint and structure, the welding process and conditions and the steel properties have been analyzed. Wide range of lamellar tearing tests has been presented. Various theories on the mechanism of lamellar tearing have been summarized.

All published references concerning the mechanism of lamellar tearing give purely theoretical informations on the problem. Taking into consideration such a situation the investigation was undertaken the main purpose of which was a more detailed approach to the mechanism of the formation of lamellar tears. The investigation was carried out using two methods: high speed cine photography and acoustic emission recording. In both cases the special specimens as well as equipments were used. In addition to the acoustic emission method the microscopical examination using optical and scanning electron microscopy were carried out.

The investigation was carried out using seven high-strength normalized and quenched-and-tempered steels of home and foreign production. Differences in the susceptibility of examined steels to lamellar tearing were established and reasons of these differences were analyzed.

The investigation has shown the general qualitative and quantitative mechanism of lamellar tearing initiation and propagation. On the other hand, it allowed to establish the conditions for testing the lamellar tearing in welded joints with the use of acoustic emission method.