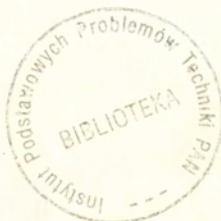


- 3.1.9. — badania doświadczalne  
3.10. — akustyka i ultradźwięki  
5.11.12. — badania doświadczalne

H. Frąckiewicz, J. Hoffman, W. Kalita  
J. Królikowski, S. Pilecki, Z. Ranachowski

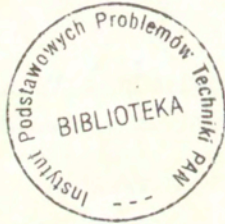
EMISJA AKUSTYCZNA  
W PROCESIE LASEROWEGO  
KSZTAŁTOWANIA METALI

24/1993



WARSZAWA 1993

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 23 marca 1993 r.



56666



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 100 egz. Ark.wyd. 3,0 Ark.druk.3,80  
Oddano do drukarni w maju 1993 r.

---

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.  
Warszawa, ul.Jasna 1

H. Frackiewicz, J. Hoffman, W. Kalita, J. Królikowski, S. Pilecki  
Z. Ranachowski

INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

## EMISJA AKUSTYCZNA W PROCESIE LASEROWEGO KSZTAŁTOWANIA METALI

### Streszczenie

Praca zawiera wyniki badań eksperymentalnych zjawiska emisji akustycznej towarzyszącej procesowi kształtowania laserowego blach ze stali kwasoodpornej, tytanowej i duralowej. Pomiaru wykonano zostały na aparaturze zaprojektowanej i zbudowanej w IPPT PAN.

### Wstęp

Celem badań zjawiska emisji akustycznej w odkształcanych laserowo elementach z materiałów kruchych była ocena możliwości zastosowania jej jako metody monitorowania zmian materiałowych zachodzących podczas tego oryginalnego procesu technologicznego a zwłaszcza powstawania pęknięć. W przypadku uzyskania mierzalnych wyników dalsze badania powinny się skoncentrować na poszukiwaniu korelacji między parametrami procesu technologicznego a parametrami sygnałów emisji akustycznej. Docelowo może to doprowadzić do udoskonalenia metody kształtowania elementów kruchych, tak aby proces ten nie prowadził do pogorszenia własności mechanicznych materiału poddanego zabiegowi naświetlania laserowego. Przede wszystkim oczekuje się uzyskania łatwej metody wykrywania mikropeęknięć materiału, które to wady mogą ograniczać bezpieczną eksploatację elementu.

Emisja akustyczna (EA) związana jest z rozprzestrzenianiem się fal sprężystych, generowanych w materiale wskutek szybkiego wyzwolenia zakumulowanej w nim energii. Może to wynikać z procesów towarzyszących bardzo różnorodnym zjawiskom, poczynając od zjawisk zachodzących w skali submikroskopowej, jak np. przeskok (dyfuzja) atomów w sąsiednie położenie w sieci krystalicznej i kończąc na wydarzeniach o skali makroskopowej, jak np. katastroficzne zniszczenie całej konstrukcji.

Rejestrowane w urządzeniach odbiorczych impulsy energii akustycznej mieszczą się w zakresie częstotliwości od kilohercowych do megahercowych. W początkowych badaniach (od 1950r.) mierzone częstotliwości rzadko przekraczały 20 kHz, tzn. mieściły się w zakresie akustycznym; stąd powstał termin emisji akustycznej. W miarę jednak doskonalenia urządzeń pomiarowych zakres ten stopniowo był rozszerzany i w 1967 r. doszedł do 1 MHz [1], w 1969 r. do 3 MHz [2], zaś w 1971 r. nawet do 30 MHz [3]. W związku z tym w niektórych publikacjach [4] zaczęto zastępować termin emisji akustycznej przez emisję fal naprężeń (stress wave emission - SWE). W większości przypadków nadal używa się jednak nazwy emisji akustycznej, która należy wszakże traktować jako nazwę umowną.

Stosowane obecnie przyrządy są w stanie rejestrować fale naprężeń wywołane zarówno przez rozprzestrzeniające się makropęknięcia lub też mikropęknięcia o rozmiarach podkrytycznych, jak i nawet już przez jednoczesne przemieszczanie się kilkudziesięciu (ok. 50) dyslokacji. Odształcenie plastyczne - jako proces wywołany ruchem wielu dyslokacji - daje znaczne efekty akustyczne w wielu czystych metalach i ich stopach. W obecnym stanie rozwoju aparatury pomiarowej nie udaje się jeszcze wykrywać EA wywołanej przez ruch pojedynczych dyslokacji, ale jest wykrywalne np. działanie źródeł Franka-Reada, generujących nowe dyslokacje.

W ciałach stałych rozpraszanie energii fal sprężystych jest nieznaczne, a zatem po wypromieniowaniu impulsu przez jego źródło fale te szybko rozprzestrzeniają się w całym badanym ciele. Dzięki temu nie ma specjalnych wymagań dotyczących lokalizacji detektorów emisji. Z drugiej jednak strony fale odbijane od przeszkód lub powierzchni ciała mogą wielokrotnie powracać do detektora w postaci zanikającego echa, które powinno być wyeliminowane przez urządzenie pomiarowe, aby nie fałszowało wyników. Spełnienie tego

warunku oraz umieszczenie na badanym obiekcie trzech lub czterech detektorów umożliwia - poprzez pomiar różnicy czasów docierania fal sprężystych do tych detektorów (system hiperboliczny) - przestrzenną lokalizację pęknięcia w konstrukcji.

Parametry emisji akustycznej

Źródła EA mogą wytwarzać fale sprężyste różnych rodzajów: podłużne, poprzeczne, giętne i powierzchniowe. Fale te rozchodzą się w materiale z różnymi prędkościami. Jeśli chodzi o częstotliwości, to ze względu na bardzo krótki czas narastania impulsów EA, rzędu nanosekund, energia fal zawarta jest w bardzo szerokim paśmie częstotliwości i może być odbierana przez przetworniki o częstotliwościach rezonansowych od 10 kHz do 30 MHz. Najbardziej praktyczny zakres pomiarowy leży między 100 kHz a 1 MHz.

W metodzie EA wymagane jest, aby badany obiekt - próbka, element konstrukcji bądź konstrukcja - znajdował się podczas pomiarów pod obciążeniem mechanicznym, termicznym lub chemicznym o poziomie wywołującym (choćby lokalnie) odkształcenie plastyczne lub zbliżone do plastycznego, bądź tworzenie się mikropeknięć i ich wzrost. Powstające wówczas fale sprężyste, docierające do powierzchni materiału, są zamieniane za pomocą przetwornika piezoelektrycznego na sygnał elektryczny. Reakcje przetwornika EA na pobudzenie mechaniczne przedstawiono na rys. 1.

Przez analizę parametrów EA możliwe jest stwierdzenie, czy w danej chwili materiał odkształca się plastycznie, czy też powstają w nim mikropeknięcia.

*Zliczenie i zdarzenie fizyczne.*

Układ pomiarowy może rejestrować wszystkie sygnały o amplitudach przekraczających poziom dyskryminacji (próg czułości) i wtedy jedno zdarzenie fizyczne zostaje zliczone jako pewna liczba amplitud, czyli tzw. *zliczeń*, lub też może rejestrować obwiednie amplitud zliczając tzw. *zdarzenia fizyczne EA* lub krótko: *zdarzenia EA*. W drugim przypadku aparatura jest bardziej złożona, dlatego też w praktyce najczęściej zliczane są amplitudy.

Do najważniejszych i najczęściej wykorzystywanych parametrów EA należą: *suma zliczeń (amplitud)*, *tempo zliczeń*, *suma zdarzeń*, *tempo zdarzeń*.

*Suma zliczeń.* Podstawowym przetworzeniem impulsu EA, umożliwiającym łatwy liczbowy zapis wyniku, jest zliczenie amplitud przekraczających pewien określony, wybierany poziom napięcia elektrycznego, zwany poziomem (progiem) dyskryminacji. Np. na rys.1 suma zliczeń (amplitud) wynosi 4. Zliczanie amplitud odbywa się od początku do końca pomiaru.

*Tempo zliczeń,* drugi podstawowy parametr EA, uzyskuje się przez zliczanie amplitud przewyższających próg dyskryminacji w kolejnych jednakowych przedziałach czasu, czyli w tzw. podstawach czasu. Jeżeli więc cały pomiar trwa np.  $M$  [s], a podstawa czasu wynosi  $N$  [s], to otrzymuje się  $M/N$  liczb, które ilustrują tempo przyrostu sumy zliczeń w kolejnych jednostkowych przedziałach czasu. (Wielkość ta bywa również nazywana prędkością EA, a bierze się z nieprecyzyjnego tłumaczenia nazwy angielskiej: AE rate).

*Sumę zdarzeń* definiuje się podobnie jak sumę zliczeń, przy czym liczone są zdarzenia EA.

*Tempo zdarzeń* EA definiuje się analogicznie do tempa zliczeń, przy czym liczone są zdarzenia zachodzące w określonej podstawie czasu.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowo zapis sumy i gęstości zliczeń oraz krzywą obciążenia  $\sigma(\epsilon)$  badanego materiału. Wyniki te uzyskuje się w dość prosty sposób, tzn. poprzez zliczanie amplitud (w przypadku sumy i tempa zliczeń), jednak są one na ogół obarczone poważnym błędem wynikającym stąd, że nie reprezentują one wartości bezwzględnej żadnej z wielkości charakteryzujących sygnał elektryczny EA, nie są bowiem porównywalne ani z energią, ani z liczbą zdarzeń EA. Wyniki te są ponadto bardzo silnie uzależnione od ustawienia poziomu dyskryminacji, a kryteria ustalania tego poziomu są zwykle dość płynne. Znikomo mały jest natomiast wpływ poziomu dyskryminacji na sumę i tempo zdarzeń, które ponadto mają dość dobrą korelację z rzeczywistą liczbą zdarzeń EA, zachodzących w badanym materiale i dlatego wartości bezwzględne tych wyników mają bardziej określone znaczenie fizyczne.

Sumę i tempo zliczeń oraz sumę i tempo zdarzeń rejestruje się w badaniach o charakterze technicznym do porównawczej oceny: jakości serii produktów, połączeń spawanych lub klejonych, własności wytrzymałościowych urządzeń takich np. jak zbiorniki ciśnieniowe itd. Wyniki te są również rejestrowane w badaniach laboratoryjnych, jednakże bardziej o charakterze technicznym niż naukowym i dotyczy przeważnie badań materiałów w zakresie

plynięcia plastycznego, rozwoju pęknięć i przemian fazowych.

Jedną z metod pomiaru EA polega na rejestrowaniu całki sygnału elektrycznego, zawierającej informacje o energii. Całkowanie sygnału EA może zachodzić np. wg następującej zależności matematycznej:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (1)$$

gdzie RMS - (root mean square - pierwiastek ze średniej kwadratów) wartość skuteczna sygnału elektrycznego,  $a(t)$  - chwilowa wartość sygnału elektrycznego,  $T$  - przedział całkowania.

Wartość  $A_{RMS}$ , wyrażana w jednostkach napięcia, jest bezpośrednio związana z energią sygnału elektrycznego (jest proporcjonalna do energii) i stanowi jakościową charakterystykę EA, niezdeformowaną operacją dyskryminacji, uzyskana bez udziału dyskryminatora i praktycznie niezależna od szumów aparatury elektronicznej. Przedział całkowania  $T$  dobiera się w zależności od częstotliwości całkowanego sygnału i możliwości zapisu krzywej RMS.

Na rys. 3 przedstawiono dla porównania zapis sumy zliczeń na tle krzywej obciążenia. Poziom zerowy RMS ustala się ze względów praktycznych na średnim poziomie szumów aparatury. Tak więc krzywa RMS jest odzwierciedleniem tylko aktywności akustycznej badanego materiału. Drugą, bardzo ważną cechą wyniku RMS jest to, że w porównaniu do tempa czy sumy zliczeń lub zdarzeń przy tym samym wzmocnieniu całkowitym jest on znacznie bardziej czuły i szybciej sygnalizuje zjawisko EA zachodzące w badanym materiale. Ma to ogromne znaczenie w badaniach nieniszczących, w których materiały ocenia się na podstawie wartości naprężenia odpowiadającego początkowi aktywności akustycznej.

Przy pomocy pomiaru wartości RMS uzyskuje się możliwość badań np. zachowania się materiału w zakresie sprężystym. Pozostaje jeszcze sprecyzować, na ile wcześniej rejestrowalny jest RMS od pozostałych parametrów. Jak wynika z badań [5] przeprowadzonych na aparaturze firmy Trodyne (USA) na rozciąganych próbkach z wyzarzonego żelaza Armco i stali 45, aktywność akustyczna rejestrowano począwszy od wartości naprężeń równej 0,65-0,8 dolnej granicy plastyczności i wydaje się, że jest to zależne zarówno od jakości aparatury, jak i prędkości wzrostu przykładanych obciążeń oraz rodzaju i właściwości mechanicznych badanego materiału.

Inną ważną metodą badania EA jest analiza sygnału elektrycznego. Za najprostsza analizę można uznać analizę amplitudową, do której używa się urządzeń o nazwie analizator amplitudy lub rozkładu statystycznego. Istotą analizy amplitudy jest zliczanie amplitud sygnału elektrycznego podobnie jak w przypadku zliczeń (por. rys. 1), z jednoczesnym segregowaniem ich pod względem wysokości. Zwykle realizuje się to zaopatrując aparaturę w zadana liczbę poziomów dyskryminacji i odpowiednią liczbę liczników. Wynik takiej operacji na sygnale elektrycznym ilustruje rys. 4. Pochodzi on z 20-kanalowego analizatora amplitudy o 40 decybelowym zakresie. Jest zwykle otrzymywany na bieżąco w czasie pomiaru EA w postaci rysunku lub wydruku bądź zapisu na taśmie magnetycznej albo perforowanej i następnie służy do analizy statystycznej, często przy użyciu komputera. Analiza widmowa sygnału elektrycznego EA jest jedną z najbardziej precyzyjnych i kompleksowych analiz, dającą najwięcej informacji o aktywności akustycznej materiału i o charakterze źródeł EA.

#### Technika laserowego kształtowania

Istota technologii laserowego kształtowania elementów metalowych, głównie z blach i rur, polega na lokalnym nagrzewaniu materiału wyjściowego za pomocą wiązki laserowej, a następnie chłodzeniu strumieniem cieczy lub gazu [6]. Procesy nagrzewania i chłodzenia wywołują w obrabianym materiale lokalne, zmienne w czasie i przestrzeni, pola naprężeń sprężystych i plastycznych prowadzących do trwałej deformacji elementu.

Kształtowanie powierzchni rozwijalnych dokonuje się przez wprowadzanie do materiału głównie termicznych naprężeń zginających, natomiast w przypadku powierzchni obrotowych deformacje uzyskuje się poprzez naprężenia sciskające i zginające. Stosowanie laserowego kształtowania pozwala na wyeliminowanie z procesu technologicznego przykładania sił zewnętrznych i wykorzystywania kosztownego oprzyrządowania: zadany kształt elementu uzyskuje się przez kontrolowane komputerowo sterowanie układem stołu, lasera i systemu chłodzącego wraz z układem monitorującym geometrie elementu.

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 5. Wiązka



promieniowania laserowego kierowana jest przez układ optyczny na soczewkę skupiającą, która pozwala dobierać średnicę wiązki przy lokalnym nagrzewaniu próbek. Element kształtowany mocowany jest na stole technologicznym X,Y,Z, którego przesuw (prędkość oraz położenie) były programowane według odpowiedniej procedury. Ruch próbki powoduje przemieszczenie wiązki promieniowania po jej powierzchni z zadana prędkością. W zależności od rodzaju materiału, wymiarów próbki oraz pożądanego charakteru wynikowej deformacji, można programować moc wiązki promieniowania i średnicę wiązki w funkcji współrzędnych naswietlanego miejsca próbki. Dla prowadzenia procesu wykorzystuje się zgromadzone dotąd dane dotyczące zarówno zależności geometrii od procedury naswietlania jak i własności zastosowanego absorbera. W omawianych badaniach stosowano pokrycia grafitem koloidalnym.

#### Eksperyment

W celu uzyskania wyników z materiałów o możliwie różnych własnościach do badań testowych wybrano elementy z blach tytanowych (stop F5), blach ze stali kwasoodpornej (1H18N9T) i blachę duralową (PA7). Skład domieszek stopowych w tych materiałach był następujący:

Blacha tytanowa F5

Al ----- 6%

V ----- 4%

Blacha kwasoodporna 1H18N9T

Cr ----- 17-19%

Ni ----- 0.8-10%

Mn ----- 2%

S ----- 0.8%

C ----- 0.1%

Ti ----- 0.5-0.8%

Blacha duralowa PA7

Cu ----- 3.8-4.8%

Mg ----- 1.2-1.8%

Mn ----- 0.4-1.1%

Wykonane zostały pomiary tempa zliczeń oraz RMS sygnałów EA w procesie laserowego gnięcia materiałów kruchych. Podstawa czasu rejestracji tych wielkości wynosiła 0.1 s.

#### Źródła sygnałów akustycznych w procesie kształtowania laserowego

W trakcie procesu formowania laserowego materiałów szeregowi zachodzących w nich zjawisk może towarzyszyć emisja fal akustycznych wchodzących w widmo fal sprężystych. Głównym ich źródłem są gwałtowne odkształcenia termiczne (dylatacyjne) wynikłe z lokalnego wzrostu i zmniejszania się temperatury. Drugim istotnym źródłem jest proces powstawania i rozwoju mikropeknień, wiążący się bezpośrednio z niesprężystym odkształcaniem materiału, tzn. z lawinowym ruchem, rozmazaniem i anihilacją dyslokacji. Należy do nich również zjawisko bliźniakowania. Poza tym występują też źródła kłopotliwych zakłóceń.

Problem odfiltrowania szumów otoczenia w pomiarach EA należy do niezwykle istotnych. Jednym ze źródeł szumów jest np. odparowywanie materiału z nagrzewanej powierzchni. Przykładowe widmo generowanych wtedy sygnałów przedstawione zostało na rysunku 6 [7]. Wynika z niego, że mamy do czynienia z widmem rezonansowym, obejmującym obszar względnie małych częstotliwości.

Generacja impulsów akustycznych występuje jednak nie tylko wtedy, gdy odparowywany jest obrabiany materiał z jego powierzchni (z warstwy wierzchniej). Jak wykazuje eksperyment (rys. 7 [8]) sygnały akustyczne powstają nawet wtedy, gdy wiązka laserowa pada na powierzchnię wypolerowanego, silnie odbijającego zwierciadła. Przebieg zarejestrowanego wówczas sygnału przed i po filtracji przedstawiają rys. 8.a i 8.b. Widmo sygnału nieodfiltrowanego przedstawia natomiast rysunek 9. Jak z niego wynika, w sygnale tym dominują częstotliwości z okolic 200 i 600 kHz. Składowe sygnały o częstotliwościach z pierwszego maksimum powstają w wyniku fluktuacji mocy lasera spowodowanej chwilowymi zmianami składu mieszanki gazowej i odstrajaniem się rezonatora. Natomiast składowe o wyższych częstotliwościach powstają na skutek oscylacji fotonów we wnętrzu wnęki rezonansowej lasera [8].

Odcięcie się od silnego sygnału szumów zapewnia, w pewnym zakresie,

odpowiednie pasmo przenoszenia użytej głowicy akustycznej, układ filtrów aktywnych analizatora EA odcinający sygnały poniżej 50 kHz, jak i poziom dyskryminacji sygnału wejściowego. Jego zbytne podniesienie grozi jednak odcięciem się od głównego przedziału sygnałów EA powstających w badanym procesie. W naszym przypadku ustawiono go na 1.4 V przy wzmacnieniu toru pomiarowego wynoszącym 43 dB. Jeśli te zabiegi nie wystarczają, trzeba próbować wyeliminować źródła szumów w najbliższym otoczeniu.

W trakcie normalnego, technologicznego zabiegu odkształcania powierzchnia próbki jest silnie chłodzona rozpyloną cieczą lub sprężonym gazem. Niestety, działania te są źródłem silnych sygnałów EA (rys. 10) zagłuszających EA powstającą w wyniku procesów deformacji wewnątrz materiału. Podobnie przedstawia się sprawa z procesem laserowego nagrzewania materiału. W trakcie naświetlania powstają silne zakłócenia elektromagnetyczne, które dodatkowo mogą powodować zablokowanie pracy urządzeń zliczających w analizatorze EA. Najczęściej z tych powodów pomiary EA mogą być przeprowadzane w zasadzie jedynie po zakończeniu procesu grzania. Proces chłodzenia wodą również jest źródłem silnych zakłóceń EA i powinien być (przynajmniej we wstępnej fazie badań) wyeliminowany. Ponadto pomiary EA powinny być przeprowadzane dopiero po wyłączeniu silnika stołu, do którego mocuje się próbkę. Silniki i ruch stołu są bowiem również źródłem silnych zakłóceń. Ilustrują to rysunki 11 i 12.

## Pomiary i wyniki

### Blacha tytanowa

We wszystkich przypadkach do powierzchni badanej próbki - w odległości  $1/3$  jej większego rozmiaru od krawędzi - przymocowywano czujnik EA. Proces naświetlania próbki wiązką promieniowania lasera  $\text{CO}_2$  ( $10.6\mu\text{m}$ ) przeprowadzano równoległe do krótszej krawędzi próbki w odległości od 2 do 3 cm od brzegu.

Badania procesów będących źródłem EA wykonywano według następującego schematu. W przypadku blachy tytanowej, po naświetleniu próbki wiązką promieniowania i wyłączeniu silników stołu uruchamiano rejestrację EA. Zwykle rejestrację prowadzono przez 10 min. W przypadku, gdy następne naświetlenie miało być wykonane po poprzednim śladzie naświetlenia, próbkę

ponownie pokrywano warstwą roztworu grafitu. Po wyschnięciu absorbera powtarzano pomiar.

Pierwszą partię badań wykonano na próbkach z blachy tytanowej o grubości 2.5 mm i rozmiarach 8X15 cmXcm. Moc lasera ustawiono na 2 kW, zaś średnicę wiązki na 8 mm, osiagając gęstość energii promieniowania zaabsorbowanego  $3.2 \text{ kW/cm}^2$  przy sprawności absorpcji rzędu 80%. W trakcie eksperymentu zmieniano prędkość przesuwu stołu z umocowaną do niego próbka, regulując w ten sposób ilość dostarczonej do próbki energii promieniowania. Stosowano prędkości: 0.75 m/min., 1.05 m/m oraz 1.5 m/min. Rejestrując sygnały EA oraz kąt zaginania blachy pod wpływem naswietlania wybrano prędkość 1.5 m/min jako najbardziej efektywną. Najdłuższy cykl pomiarowy obejmował 10 przejazdów wiązki po tym samym śladzie. Zarejestrowane wartości tempa zliczeń przedstawiają rysunki 13-23. Wynika z nich, że początkowo EA jest bardzo słaba i czasami nawet nie rejestrowalna. Dotyczyło to przede wszystkim pierwszego przejazdu. W następnych przejazdach tempo zliczeń EA wzrastało, przy czym maksymalne rejestrowane wartości wynosiły w kolejnych przejazdach  $N = 3; 20; 140; 600$ , aby od piątego przejazdu ustabilizować się na poziomie około 1300. We wszystkich zarejestrowanych przypadkach tempo zliczeń szybko malało od chwili zakończenia grzania próbki. Ma ono w przybliżeniu charakter zaniku eksponencjalnego z półokresem około 20 s. Choć po 10 min liczba rejestrowanych sygnałów drastycznie zmniejszała się w porównaniu ze stanem początkowym, to jednak proces ich generacji nie ustawał. Można zauważyć (rys. 19), że nawet po 30 minutach występują sygnały EA, których źródłem jest proces kształtowania laserowego.

#### Blacha stalowa

Podobny charakter zależności obserwowano również w przypadku grzania laserowego blachy ze stali kwasoodpornej. Optymalna prędkość przesuwu wynosiła w tym przypadku 1.05 m/min. Ta część pomiarów wykonana została na innym, mniej zakłócającym stole technologicznym. Pozwoliło to rejestrować EA również podczas naswietlania powierzchni próbki. Rysunki 24-30 ilustrują zgromadzone wyniki. Po pierwszym przejeździe nie zarejestrowano żadnego sygnału EA. Po drugim przejeździe pojawiły się nieliczne, pojedyncze impulsy EA. Po kolejnych tempo EA stopniowo rosło - do 140 po piątym i szóstym przejeździe.

Zmniejszenie prędkości przesuwu do 0.5 m/min spowodowało (w nowym

miejscu) silne przegrzanie próbki, co przejawiało się w przebarwieniu obszaru nasświetlonego w przekroju poprzecznym i silnym nadtopieniu powierzchni. Wykonano dwa przejazdy po tym samym śladzie, uzyskując słabe odkształcenie próbki, ale bardzo intensywną EA już po pierwszym przejeździe (rys. 32). Po drugim tempa EA było dwa razy wyższe (rys. 33). W tym przypadku czas połowicznego zaniku wynosił około 50 s.

Charakter rozkładu tempa zliczeń EA w funkcji czasu, przypominający przebieg wykładniczy, zarówno w próbkach tytanowych, jak i ze stali kwasoodpornej, nasuwa przypuszczenie, że wiąże się on ze zmianą temperatury w obszarze nasświetlania. Takie przypuszczenie wynika z analogii z wynikami obserwacji zgromadzonych na podstawie monitorowania procesu spawania [9]. Pokazuje to rysunek 31. Maksymalne tempa zliczeń przypada na najwyższą wartość temperatury spoiny.

Dopasowanie do ciągu tempa EA eksponencjalnej obwiedni pozwala wyznaczyć współczynniki zaniku w każdym procesie nasświetlania. Odpowiednie obliczenia wykonane metodą najmniejszych kwadratów dały wyniki przedstawione na rys. 34 i 35. Dopasowywano krzywe postaci

$$N_i = N_0 e^{-\alpha i T} \quad (2)$$

gdzie  $\alpha$  oznacza współczynnik zaniku,  $i$  jest numerem kolejnego próbkowania, zaś  $T$  - przedziałem czasu próbkowania.

Wyniki obliczeń przedstawione na obu wykresach (rys. 34, 35) pozwalają uznać, że praktycznie wartość parametru  $\alpha$  nie zależy od kolejności przejazdu w procesie nasświetlania i dla danej próbki przybiera stałą wartość. Znaczna wartość tego parametru uzyskana po pierwszym nasświetlaniu jest jedynie skutkiem dużych rozrzutów wartości tempa emisji w tym przypadku. Było ono bardzo małe. Rejestrowano tylko szczytkową EA o małej amplitudzie, niewiele przekraczająca poziom szumów, i o dużym rozrzucie tempa.

Dla blachy tytanowej średnia wartość współczynnika zaniku wynosi około  $2.5 \cdot 10^{-3}$ , zaś dla blachy kwasoodpornej około  $2 \cdot 10^{-3}$ .

W trakcie pomiarów rejestrowano również wartość RMS. Wielkość ta uśredniana była po przedziale czasu równym czasowi próbkowania. Kwadrat tej wielkości jest proporcjonalny do energii rejestrowanego impulsu. W aparaturze pomiarowej, przy użyciu której przeprowadzono pomiary

średniokwadratowej wartości napięcia, 1 mV na głowicy pomiarowej odpowiadało 500 umownym jednostkom pomiarowym. W takich właśnie jednostkach wykonane zostały wszystkie, wykorzystujące RMS wykresy. Na rysunkach 36 i 37 przedstawiono dwa przykładowe przebiegi wartości RMS w funkcji czasu chłodzenia naświetlonych próbek z blachy tytanowej i kwasoodpornej. Przypominają one przebiegi zależności czasowych tempa zliczeń EA, (por. np. rys.22, 33).

Wyniki obliczeń sumy kwadratów RMS po każdym naświetleniu wraz z odpowiednimi wartościami sumy zliczeń dla obu próbek przedstawiają rysunki 38 i 39. Wynika z nich, że zarówno suma zliczeń EA, jak i całkowita ich energia, zarejestrowane po kolejnych naświetleniach powierzchni rosną. Zmiany rejestrowanej energii odzwierciedlają w danej próbce zmiany całkowitej liczby impulsów. Należy podkreślić, że w próbce z blachy kwasoodpornej, podobnie jak i w tytanowej, wszelkie obliczenia przeprowadzono tylko dla sygnałów zarejestrowanych podczas chłodzenia. Jeśli uwzględnimy dodatkowo sygnały rejestrowane w czasie naświetlania powierzchni to jak wykazuje rysunek 40 - charakter wyznaczonych zależności nie ulega wyraźnej zmianie. Pewien obraz zachodzących w nagrzonej próbce procesów, których przejawem jest generacja sygnałów EA, daje wartość średniej energii impulsu akustycznego powstałego po kolejnych naświetlaniach. Odpowiednie wyniki dla obu testowanych materiałów przedstawiają rys. 41 i 42. Wynika z nich, że w obu przypadkach po kolejnych przejazdach energia generowanych impulsów rośnie. O wartościach zaś rozkładów średniej energii impulsów akustycznych po poszczególnych naświetlaniach można zorientować się na podstawie rys. 43 - 47. Przedstawiają one średnią wartość kwadratu RMS przypadającą na jeden zarejestrowany impuls w okresie pojedynczego próbkowania (0.1 s). Widać, że wielkość ta zmienia się silnie podczas chłodzenia i zależy również od liczby wykonanych naświetlań.

Na rys. 48 i 49 przedstawiono przykładowe zależności sumy zliczeń EA zarejestrowane w trakcie pojedynczego naświetlania obu omawianych materiałów. Widać na nich, że obraz akustyczny badanego procesu jest bardzo podobny do uzyskanego z monitorowania EA procesu spawania. Przykładowy przebieg sumy zliczeń EA po zakończeniu spawania stali przedstawiają rysunki 50-52, [10].

## Blacha duralowa

Badanie metodą EA procesu wielokrotnego naświetlania wiązką lasera próbek z blachy duralowej okazało się o wiele trudniejsze. Wynika to z faktu, że często brakowało rejestrowalnej emisji po zakończeniu procesu grzania, trwającego zwykle do 10 s. Pomiarów tego materiału wykonano na czterech próbkach, z których trzy o symbolach d1, d2 i d3 miały wymiary 5X10 cmXcm i grubość 2 mm, natomiast czwarta próbka o symbolu d4 miała wymiary 10X15 cmXcm i grubość 3 mm.

W przypadku próbek cieńszych, naświetlanych wielokrotnie, z różnymi prędkościami, obserwowano EA jednorazowo, tzn. po którymś naświetlaniu pojawiały się sygnały akustyczne, które trwały przez kilkadziesiąt sekund i nie pojawiały się więcej po kolejnych naświetlaniach. Obserwowano je np. po dziewiątym przejeździe z prędkością 1.5 m/min (moc lasera 2.2 kW) w próbce d2 lub po pierwszym naświetlaniu z prędkością 0.25 m/min (moc lasera 2 kW) próbki d3. Wyniki pomiarów tempa zliczeń EA tych próbek przedstawiają rysunki 53-58. W próbce d1 nie zaobserwowano wyraźnej EA w czasie chłodzenia. We wszystkich tych przypadkach próbki zaginały się podczas naświetlania. Towarzyszyło im nadtapianie materiału na krawędzi. Obserwowano także przypadki, w których dochodziło do nadtapiania materiału, ale nie pojawiała się EA.

W większości przypadków jeśli pojawiały się impulsy akustyczne to mogło to mieć miejsce jedynie w trakcie naświetlania, tzn. wówczas, gdy EA jest maslowana przez zakłócenia elektromagnetyczne wywołane wiązką prośnieniowania laserowego. Kolejne naświetlania prowadziły w końcu do widocznego pęknięcia próbki w obszarze silnych deformacji. Nie było tego jednak widać w obrazie EA rejestrowanym już po zakończeniu nagrzewania. Należy zatem przypuszczać, że proces pęknięcia zachodzi podczas samego naświetlania.

Wyniki obliczeń sumy kwadratów RMS i sumy zliczeń po kolejnych naświetlaniach próbek d1 i d2 przedstawiono na rysunkach 59 i 60. Należy je jednak traktować jedynie jako informacje orientacyjne, bowiem w czasie pracy lasera często występowała tak duża liczba sygnałów, że czasami prowadziło to do przepełnienia liczników, w wyniku czego pewna część sygnałów nie została zarejestrowana. Dotyczy to również przedstawionych na rysunkach 61 i 62 wartości średniej energii impulsów w poszczególnych naświetlaniach. EA rejestrowana podczas chłodzenia przebiegała w bardzo

charakterystyczny sposób, występowała bowiem dopiero po kilkunastu sekundach od chwili zaprzestania nagrzewania materiału. Tempo EA narastało początkowo w czasie aby - po osiągnięciu maksimum - zacząć szybko maleć do zera. Obraz ten istotnie różni się od zachowania akustycznego próbek z blachy tytanowej i kwasoodpornej. W obu tych materiałach obserwowano bowiem jedynie zmniejszenie tempa EA po zakończeniu nagrzewania.

Nowe światło na zjawisko EA towarzyszące zaginaniu duralu rzuciły rezultaty pomiarów EA w próbce o większych rozmiarach (d4), która naświetlano przy prędkości stołu 3 m/min. Moc lasera wynosiła 2.5 kW, a średnica wiązki 7.5 mm. Wyniki ilustrują rysunki 63-71. Natychmiast po czwartym przejeździe pojawiła się rejestrowalna EA, której tempo zaczęło narastać po następnych naświetlaniach. Charakter zależności był podobny do obserwowanej w poprzednio badanych próbkach duralowych. Największa wartość tempa zliczeń EA wystąpiła po ósmym przejeździe. Próbka zaginała się, lecz nie wystąpiło widoczne jej pęknięcie. W czasie kolejnych naświetleń tempo zliczeń EA zaczęło spadać, aż w czasie jedenastego naświetlania ustало zupełnie.

Podobnie jak dla poprzednich próbek obliczone zostały wartości sumy zliczeń i sumy kwadratów RMS po każdym naświetlaniu zarejestrowane tylko podczas chłodzenia. Przedstawia je rysunek 72. Widoczne są maksima tych wielkości, występujące dla sumy zliczeń po ósmym, a dla sumy kwadratów RMS po siódmym naświetlaniu.

Z kolei średnia energia pojedynczego impulsu była największa po czwartym naświetleniu a po następnych stopniowo spadała (rys.73). Dodatkowo sporządzonych zostało również kilka wykresów (rys. 74-78) ilustrujących zmiany średniej energii rejestrowanych impulsów w trakcie chłodzenia po niektórych naświetlaniach próbki d4.

## Wnioski

Za główny powód powstawania sygnałów EA uważa się proces odkształcania plastycznego i powstawania pęknięć. Pod uwagę należy brać trzy możliwe przypadki: 1) rozwój dużych, zwykle kilku pęknięć; 2) pęknięcie rozwijające się od ziarna do ziarna; 3) duża ilość małych pęknięć. Może również zachodzić każda kombinacja tych wymienionych przypadków.



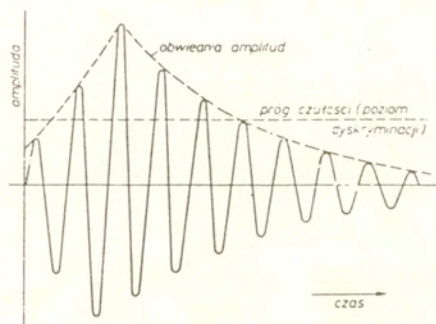
W przypadku badania metodą EA procesu spawania materiałów okazało się bowiem, że istotna EA może zachodzić wiele godzin, a nawet po kilkunastu dniach od zakończenia spawania. Ta metoda monitoruje się więc opóźnione powstawanie pęknięć, prowadzące do osłabienia spawu. Można przypuszczać, że w procesie zaginania laserowego zachodzi podobna sytuacja.

Skorzystanie z doświadczeń nad badaniem EA w procesie spawania wydaje się celowe ze względu na konieczność przeprowadzania dokładnych pomiarów podczas naświetlania powierzchni, gdy rejestracja jest zakłócona generowanymi przez laser szumami. Pewne nadzieje na pokonanie tej trudności można wiązać ze stosowaniem odpowiednio dobranych filtrów częstotliwościowych, które np. w spawach pozwalają na skuteczne odcięcie się od wszystkich akustycznych sygnałów zakłócających. Takie wnioski wynikają bowiem z najnowszych prac nad bieżącą kontrolą procesu spawania przy użyciu techniki EA [11].

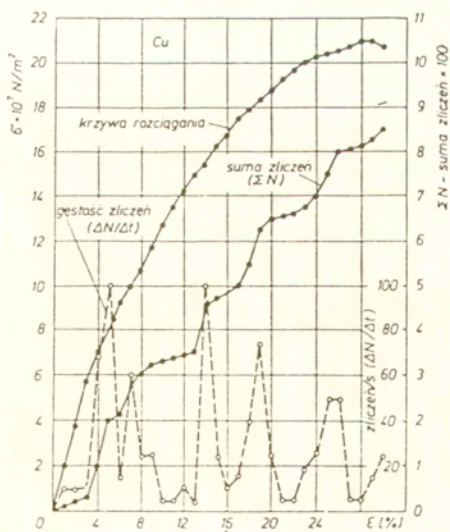
Pełne opracowanie rezultatów przeprowadzonych pomiarów EA może mieć miejsce dopiero po wykonaniu badań metalograficznych zaginanych materiałów i powiązaniu obrazu zglądu z warunkami występowania EA.

## Literatura

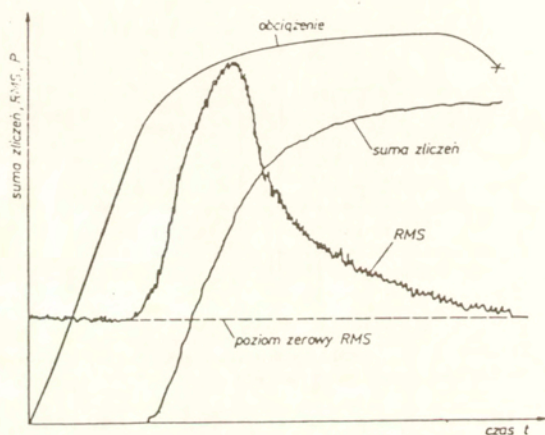
- 1) H. L. Dunegan, G. A. Tatro, Passive pressure transducer utilizing acoustic emission, Rev. Sci. Instrum., 38, Aug. (1967)
- 2) P. H. Hutton, Detection of acoustic emission in the presence of hydraulic noise, Nondestructive Testing, 2, 5 (1969)
- 3) P. H. Hutton, D. L. Parry, Assessment of structural integrity by acoustic emission, Mat. Res. Stand., 3 (1971)
- 4) W. W. Gerberich, C. E. Hartbower, Some observations on stress wave emission as a measure of crack growth, Int. J. Fract. Mech., 3, 185-192 (1967)
- 5) S. Pilecki, J. Siedlaczek, Archives of Acoustic, 14, 3-4, 261-281, (1989)
- 6) H. Frackiewicz Method of Sheet-Metal Forming, (praca niepublikowana)
- 7) Laser machining, Theory and Practice, George Chryssolouris, Springer-Verlag 1991.
- 8) Laser material procesing, William M. Steen, Springer-Verlag 1991.
- 9) Schallemission, Berichte zum Symposium der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde, München, April 1974.
- 10) Acoustic emission, A Symposium Presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials, Bal Harbour, Florida, 7-8 December 1971.
- 11) Pilecki, Emisja Akustyczna w metalach (w druku)



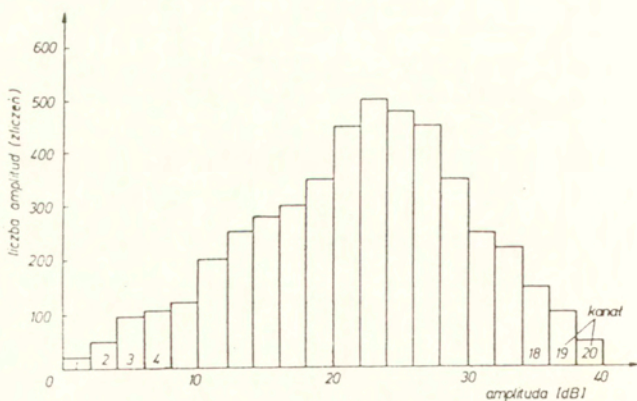
Rys. 1. Zliczenia EA (amplitudy fali sprężystej) oraz zdarzenie EA odbierane przez przetwornik.



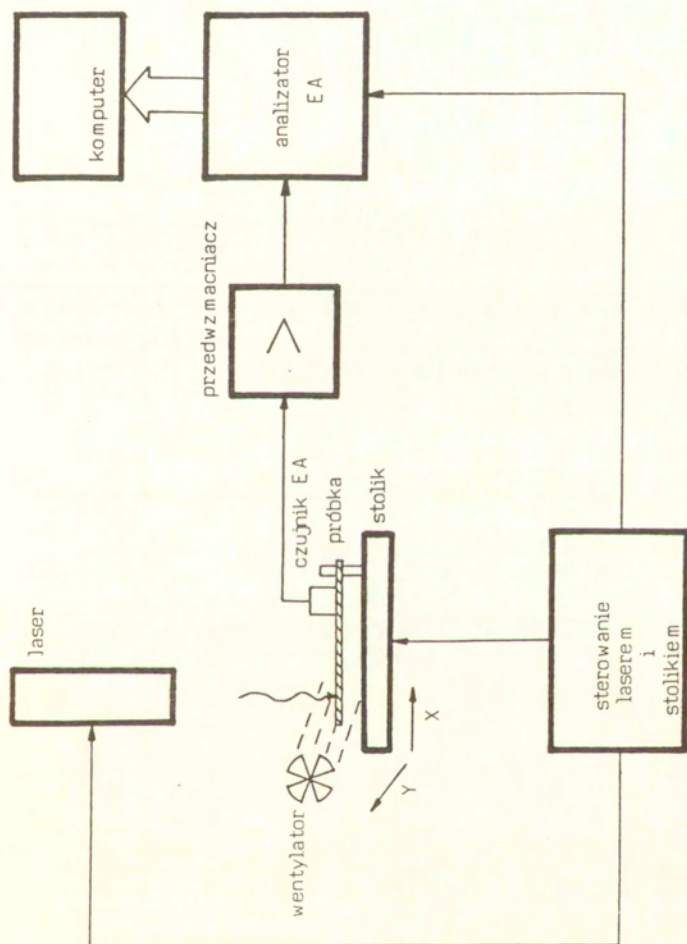
Rys. 2. Suma i gęstość zliczeń EA oraz krzywa rozciągania miedzi.



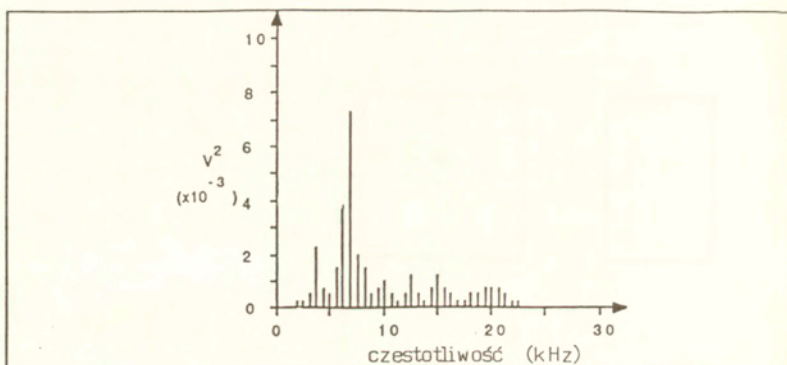
Rys. 3. Sumy zliczeń, RMS i krzywa rozciągania.



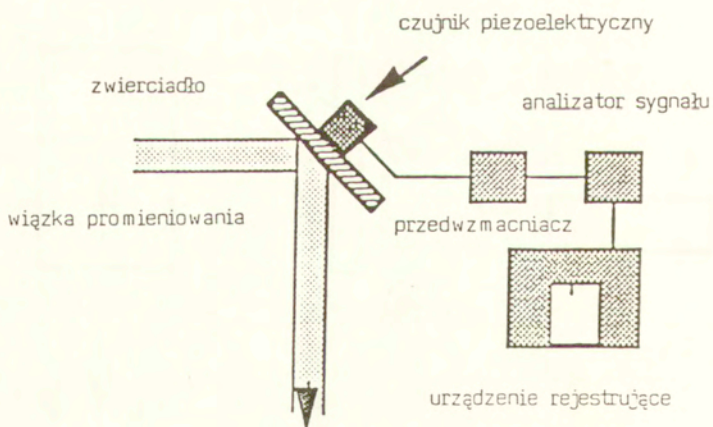
Rys. 4. Histogram amplitud sygnału elektrycznego uzyskany przez podział ich widma na 20 przedziałów.



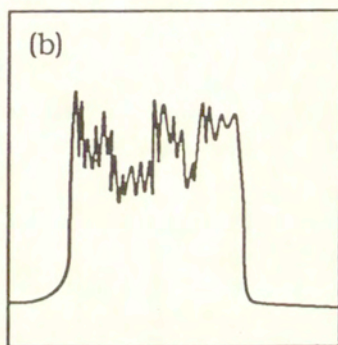
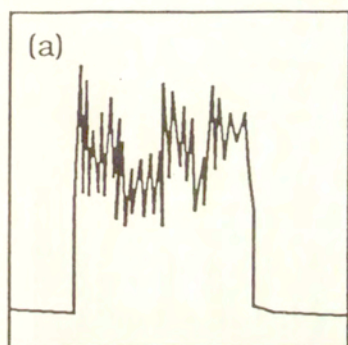
Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do rejestracji EA.



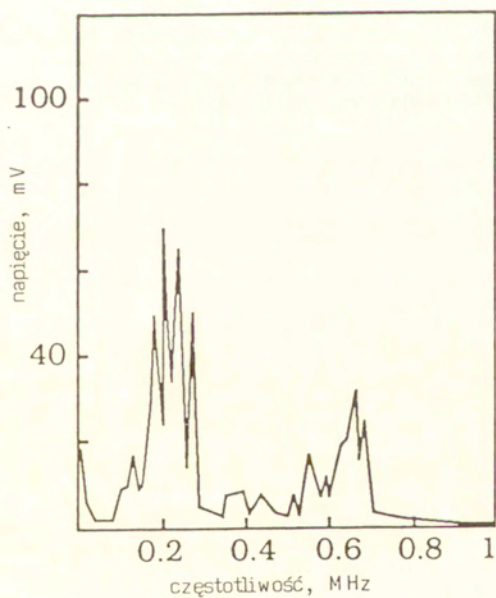
Rys. 6. Widmo drgań wywołanych obróbką laserową. Moc lasera 400 W, prędkość przesuwu 1.5 cm/s.



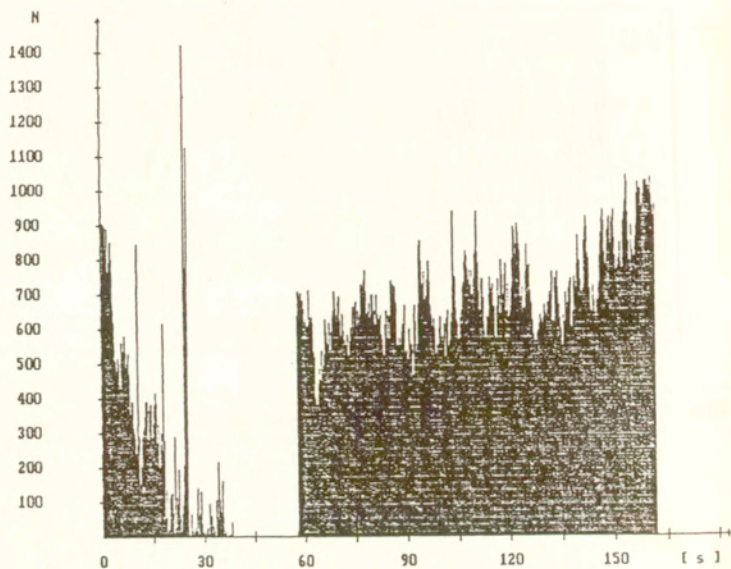
Rys. 7. Schemat układu pomiarowego do rejestracji sygnałów akustycznych generowanych w zwierciadle odbijającym promieniowanie laserowe.



Rys. 8. a) Sygnał akustyczny rejestrowany przez czujnik umieszczony na zwierciadle odbijającym promień lasera, b) ten sam sygnał po przejściu przez filtr dolnoprzepustowy.

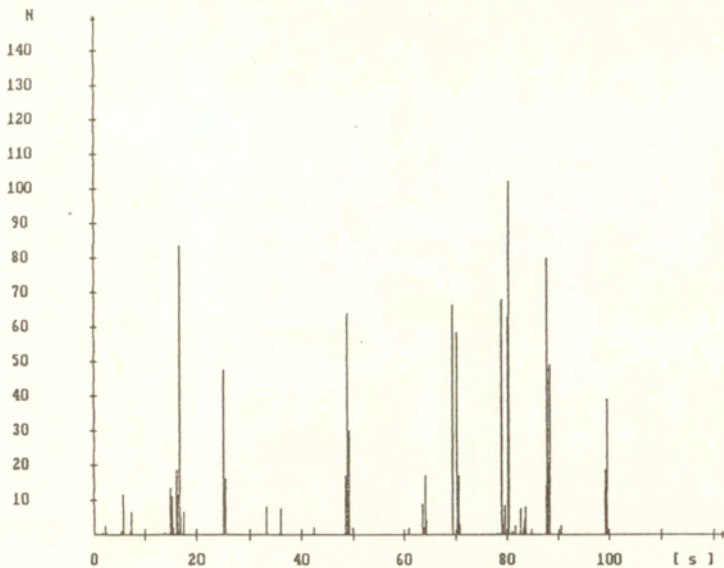


Rys. 9. Widmo częstotliwościowe sygnału akustycznego przedstawionego na rys. 8.a.

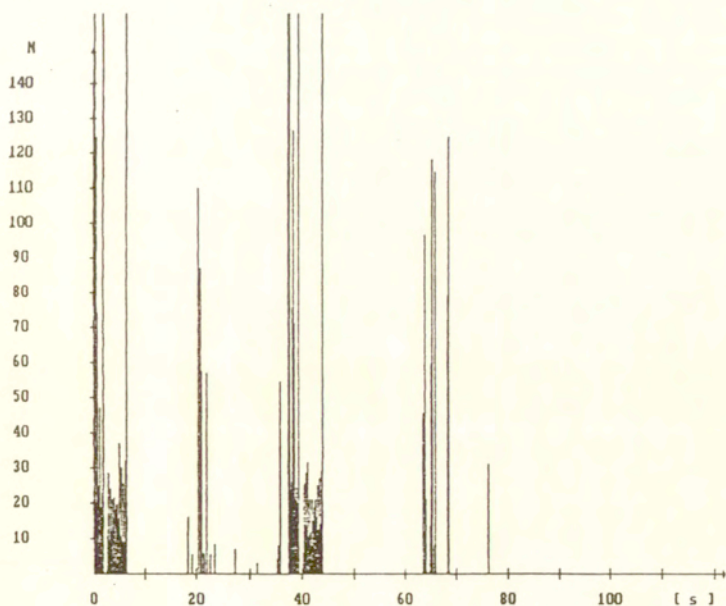


Rys. 10. Tempo zliczeń sygnałów akustycznych rejestrowanych przez czujnik EA przymocowany do płytki tytanowej, gdy stół technologiczny spoczywa nieruchomo, a na powierzchni próbki natryskiwana jest woda.

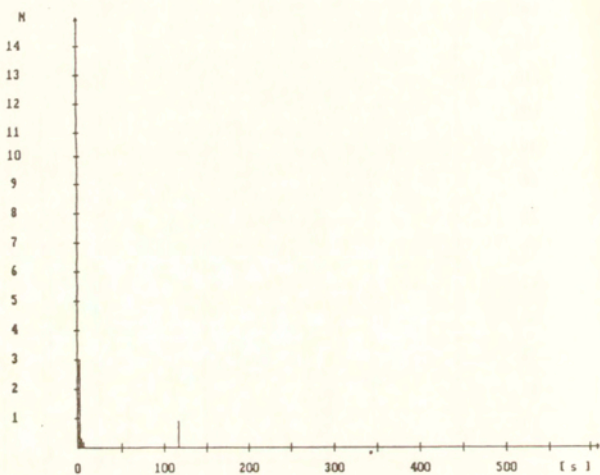




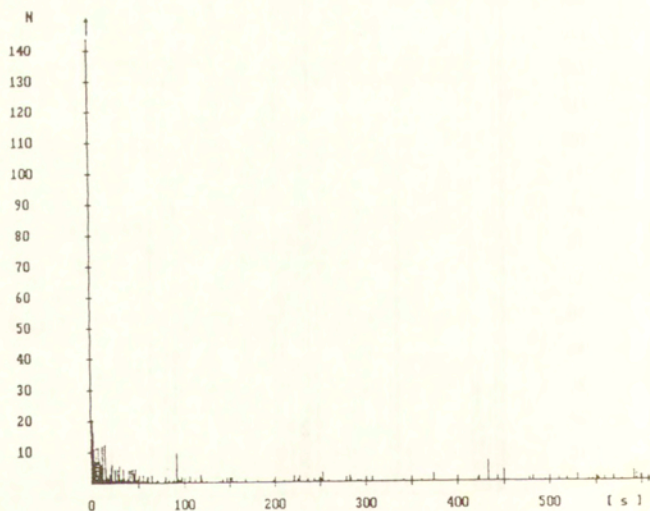
Rys. 11. Tempo zliczeń sygnałów akustycznych rejestrowanych przez czujnik EA przymocowany do płytki tytanowej, gdy stolik technologiczny spoczywa nieruchomo, a pracują napędzające go silniki elektryczne.



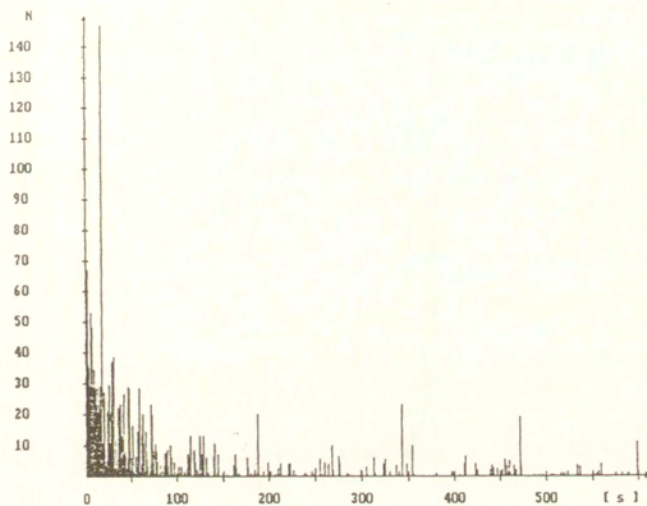
Rys. 12. Tempo zliczeń sygnałów akustycznych rejestrowanych przez czujnik EA przymocowany do płytki tytanowej, gdy stolik technologiczny porusza się ze stałą prędkością 1.5 m/min.



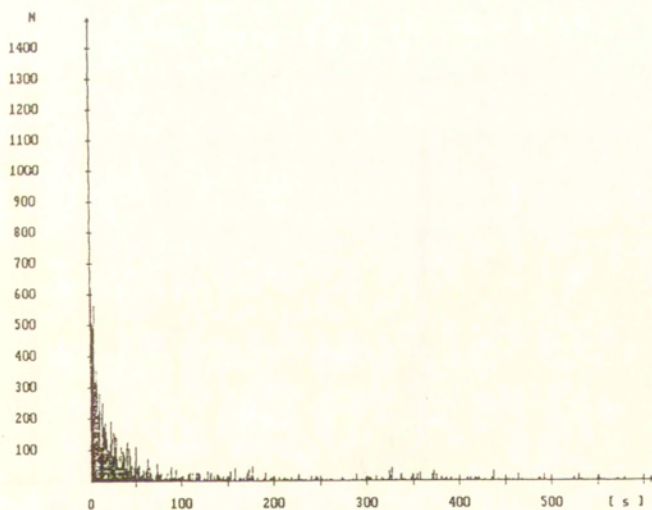
Rys. 13, Tempo EA w płytce tytanowej po pierwszym naświetleniu.



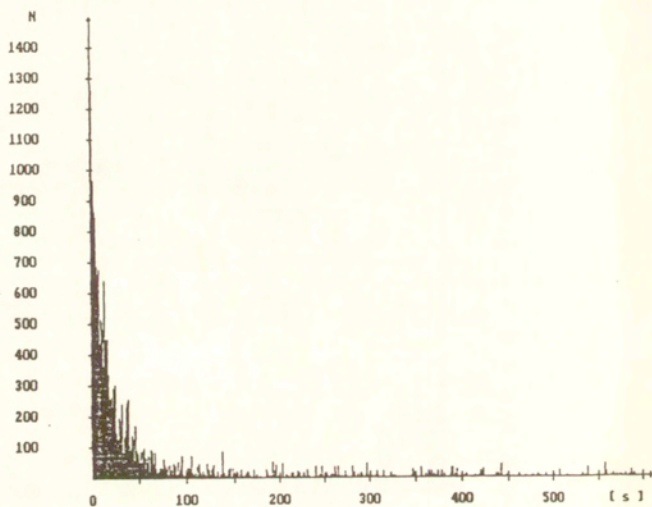
Rys. 14. Tempo EA w płytce tytanowej po drugim naświetleniu.



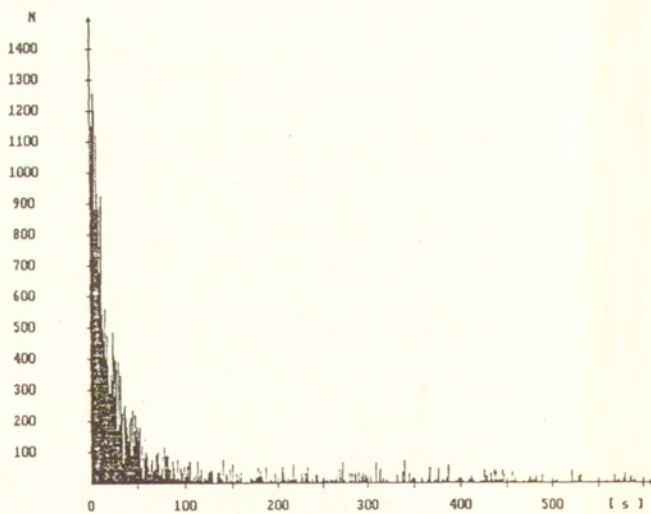
Rys. 15. Tempo EA w płytce tytanowej po trzecim naswietleniu.



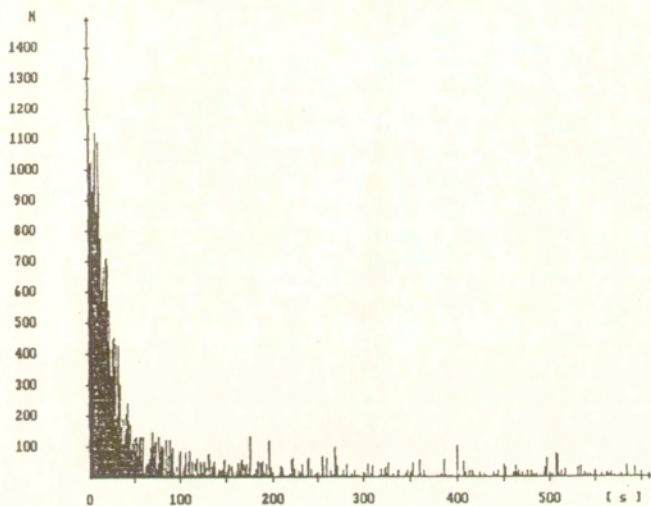
Rys. 16. Tempo EA w płytce tytanowej po czwartym naswietleniu.



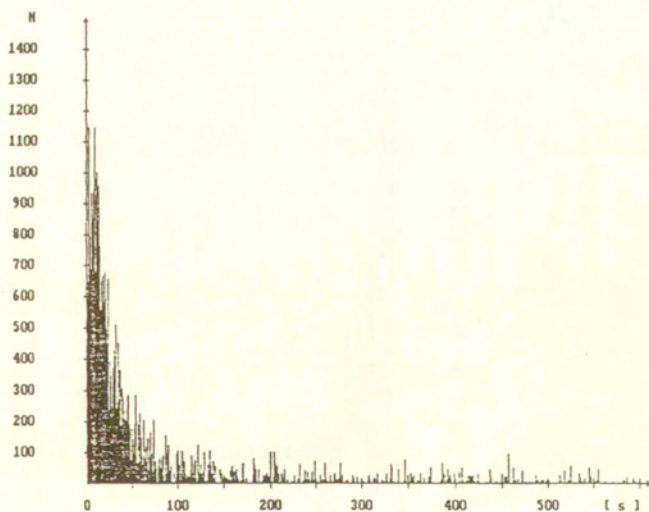
Rys. 17. Tempo EA w płytce tytanowej po piątym naswietleniu.



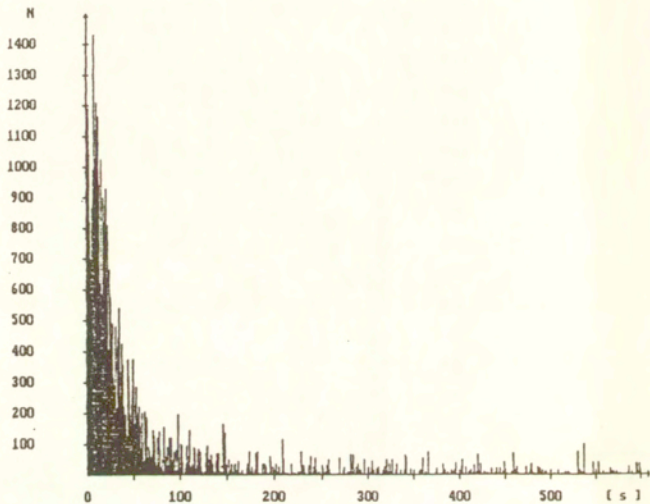
Rys. 18. Tempo EA w płytce tytanowej po szóstym naswietleniu.



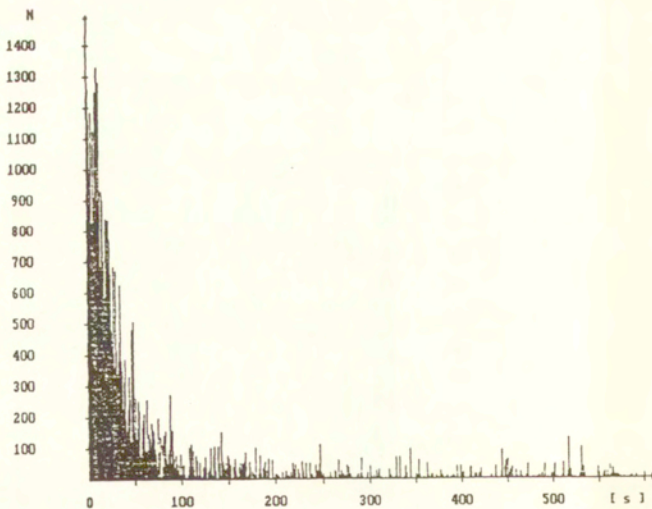
Rys. 19. Tempo EA w płytce tytanowej po siódmym naświetleniu.



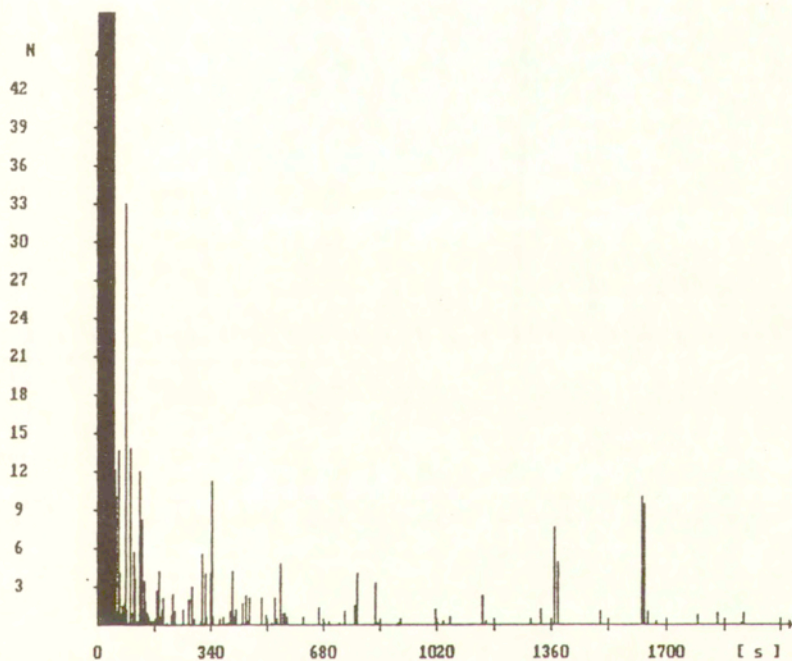
Rys. 20. Tempo EA w płytce tytanowej po ósmym naświetleniu.



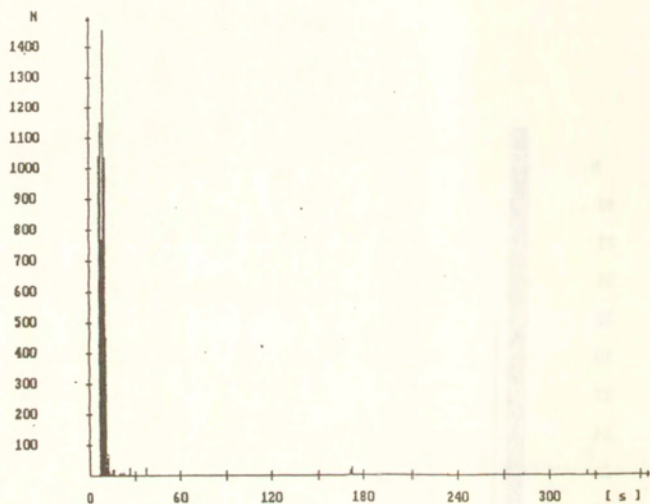
Rys. 21. Tempo EA w płytce tytanowej po dziewiątym naświetleniu.



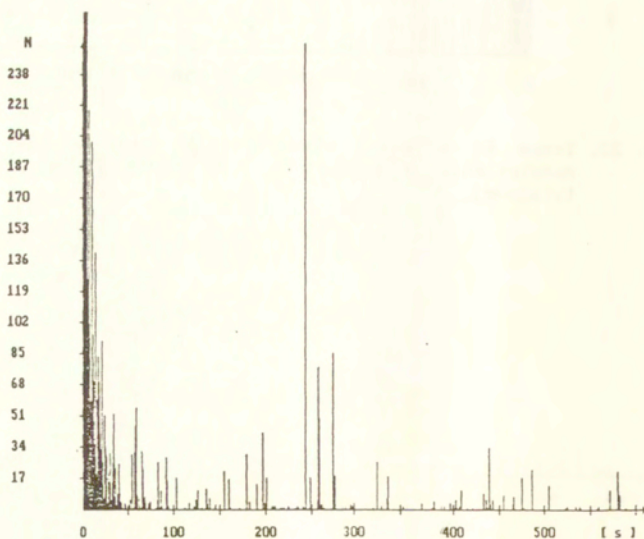
Rys. 22. Tempo EA w płytce tytanowej po dziesiątym naświetleniu.



Rys. 23. Tempo EA w ciągu pierwszych 30 min. po zakończeniu naświetlania z prędkością 0.75 m/min próbki z blachy tytanowej.

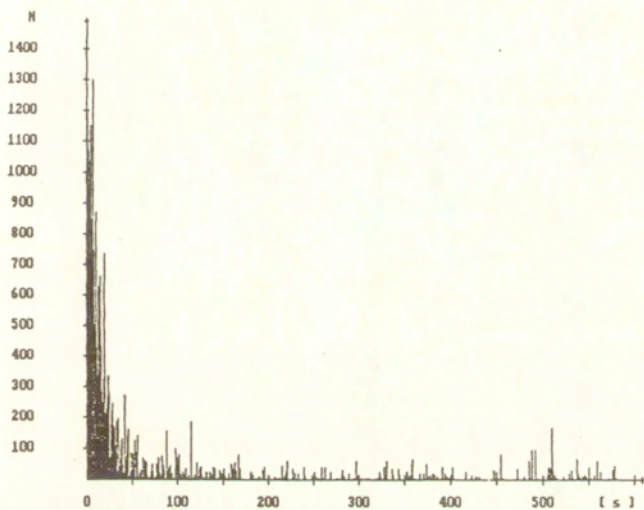


Rys. 24. Tempo EA w płytce z blachy kwasoodpornej po pierwszym naswietlaniu.

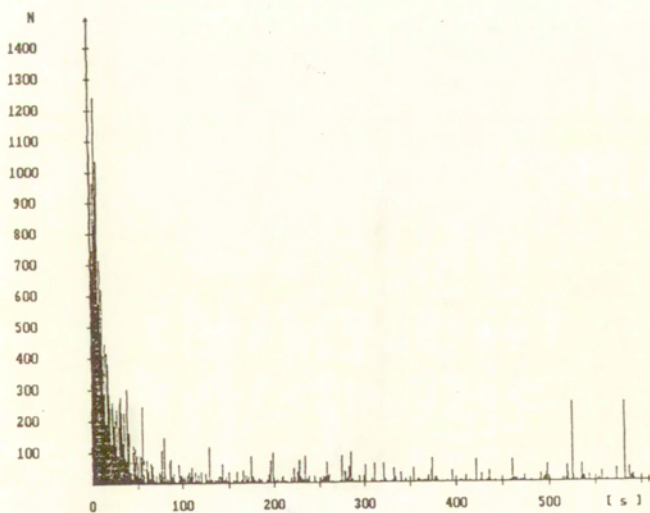


Rys. 25. Tempo EA w płytce z blachy kwasoodpornej po drugim naswietlaniu.

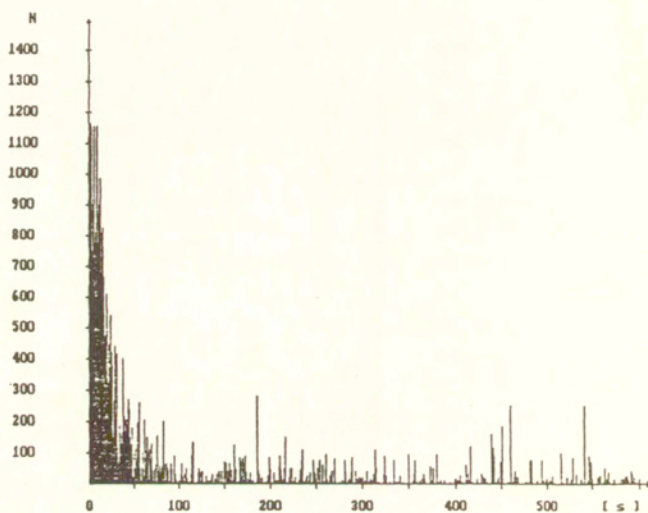




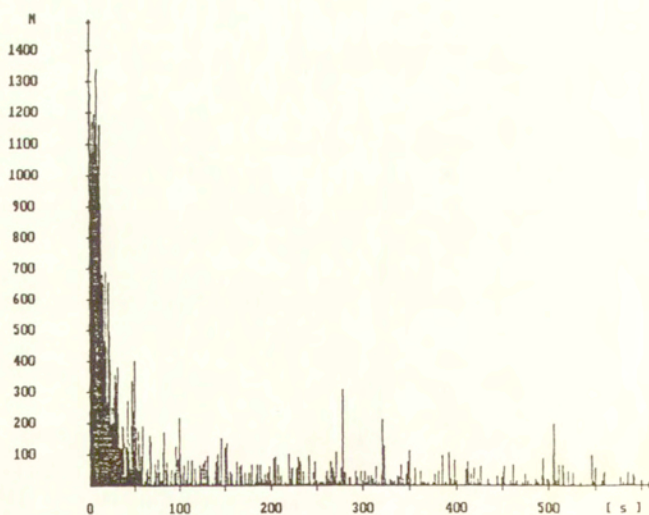
Rys. 26. Tempo EA w płytce z blachy kwasoodpornej po trzecim naświetlaniu.



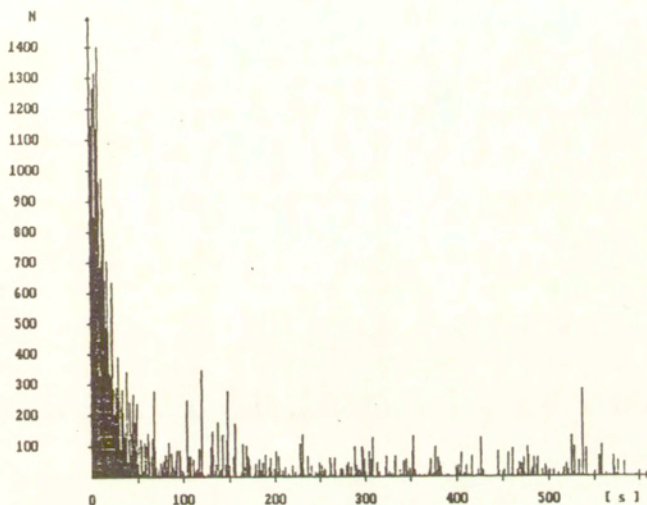
Rys. 27. Tempo EA w płytce z blachy kwasoodpornej po czwartym naświetlaniu.



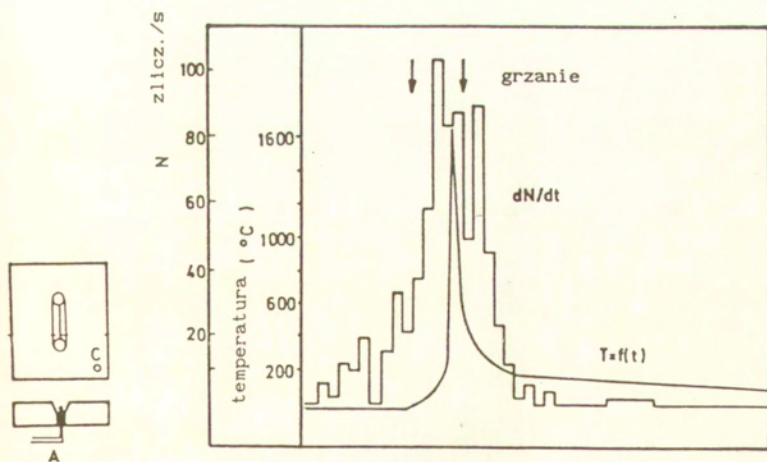
Rys. 28. Tempo EA w płytce z blachy kwasoodpornej po piątym naświetlaniu.



Rys. 29. Tempo EA w płytce z blachy kwasoodpornej po szóstym naświetlaniu.

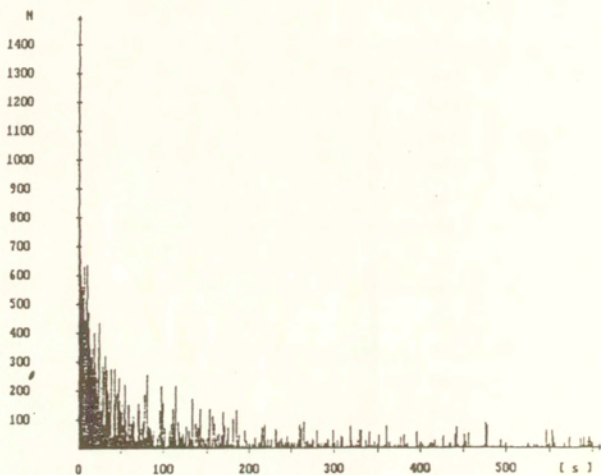


Rys. 30. Tempo EA w płytce z blachy kwasoodpornej po siódmym naświetlaniu.

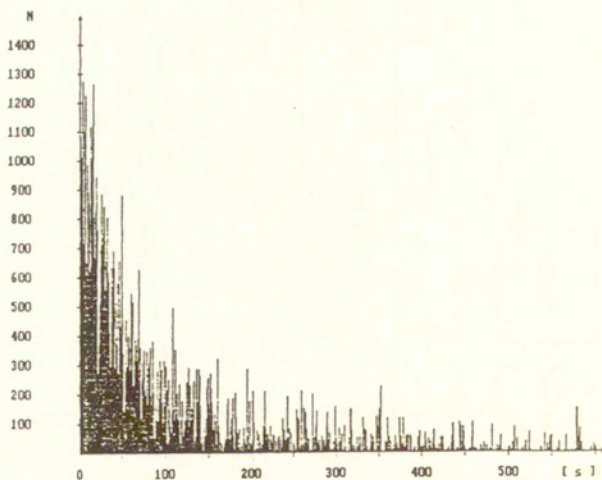


- A - termopara
- C - czujnik EA

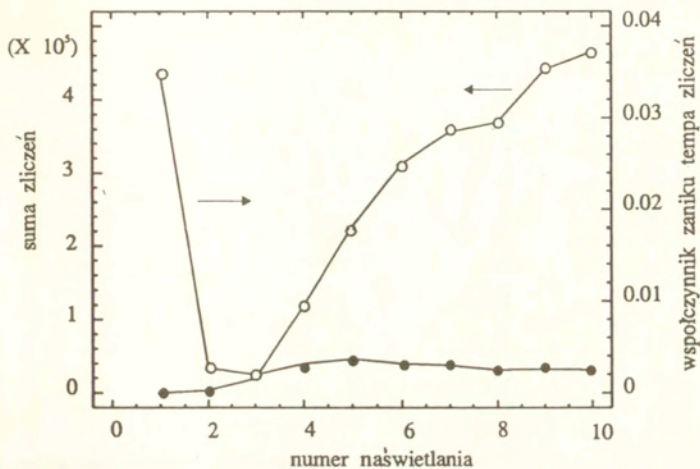
Rys. 31. Tempo EA w funkcji czasu w procesie spawania.



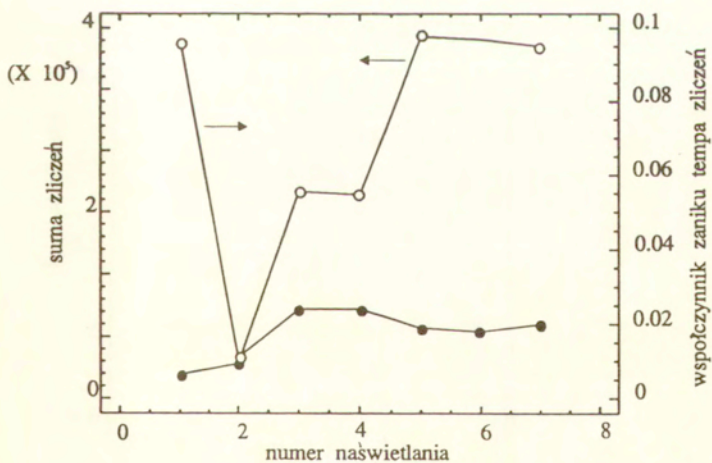
Rys. 32. Tempo sygnałów EA w próbce z blachy kwasoodpornej po pierwszym skanowaniu z prędkością 0.5 m/min (moc 2 kW).



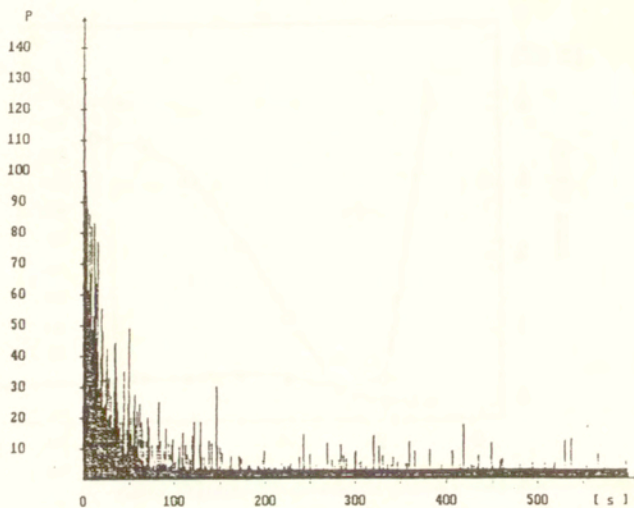
Rys. 33. Tempo sygnałów EA w próbce z blachy kwasoodpornej po drugim skanowaniu z prędkością 0.5 m/min (moc 2 kW).



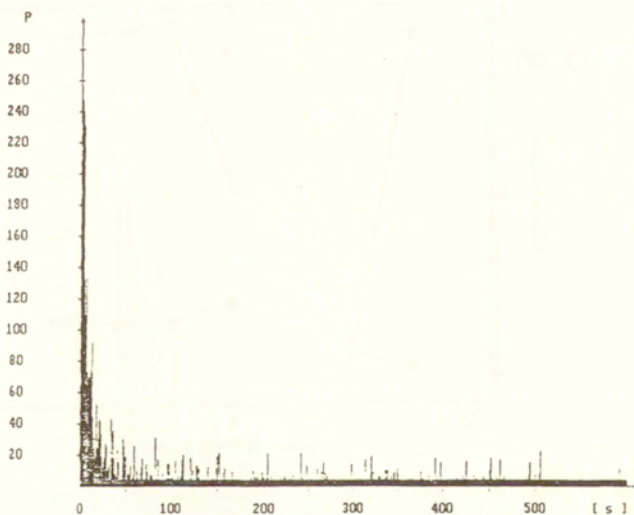
Rys. 34. Suma zliczeń i współczynnik zaniku tempa EA w funkcji ilości naświetleń w próbce tytanowej.



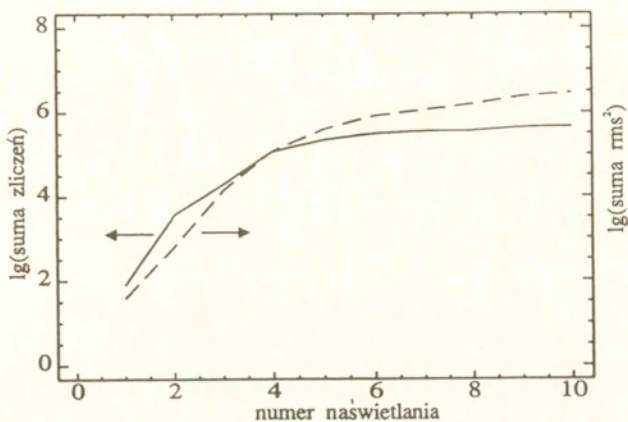
Rys. 35. Suma zliczeń i współczynnik zaniku tempa EA w funkcji ilości naświetleń w próbce z blachy kwasoodpornej.



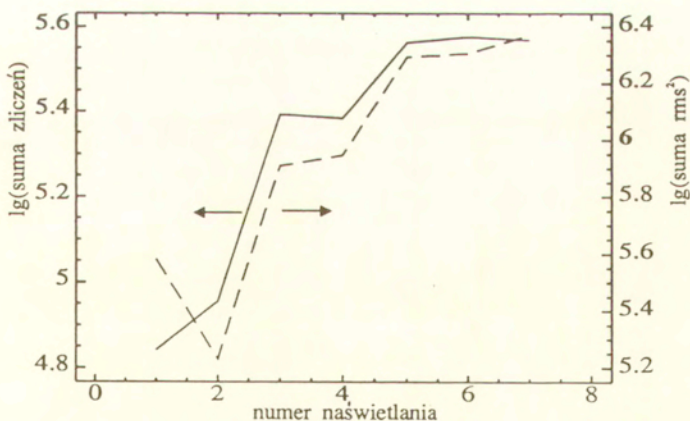
Rys. 36. Tempo sygnałów RMS w funkcji czasu chłodzenia w próbce tytanowej po dziewiątym naświetleniu.



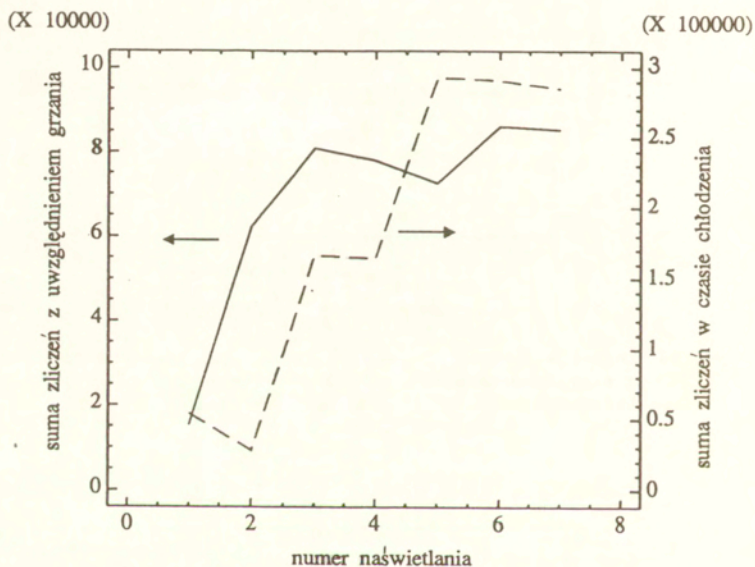
Rys. 37. Tempo sygnałów RMS w funkcji czasu chłodzenia w próbce z blachy kwasoodpornej po szóstym naświetleniu.



Rys. 38. Logarytm dziesiętny z sumy zliczeń oraz logarytm dziesiętny z sumy kwadratów RMS w funkcji liczby naświetleń w próbce tytanowej.

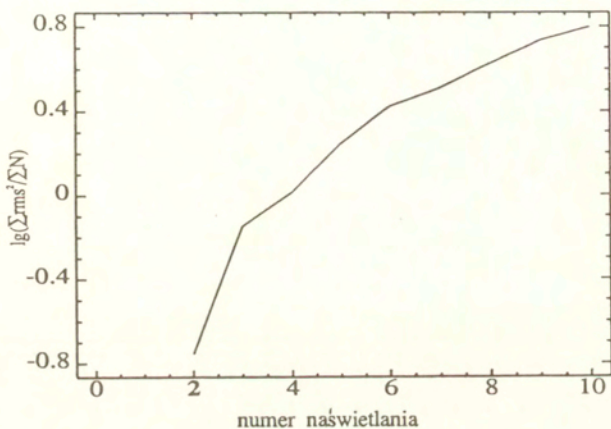


Rys. 39. Logarytm dziesiętny z sumy zliczeń oraz logarytm dziesiętny z sumy kwadratów RMS w funkcji liczby naświetleń w próbce z blachy kwasoodpornej.

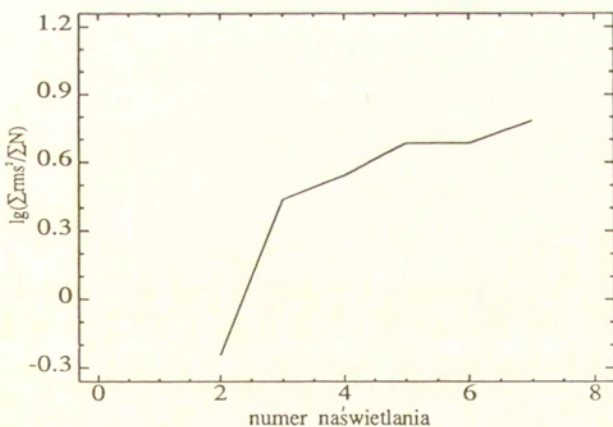


Rys. 40. Suma zliczeń EA w funkcji liczby naświetleń w próbce z blachy kwasoodpornej rejestrowana tylko w czasie chłodzenia (----) oraz w czasie grzania i chłodzenia (—).

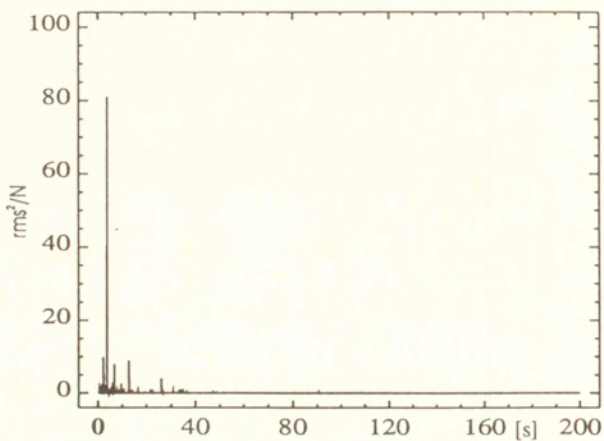




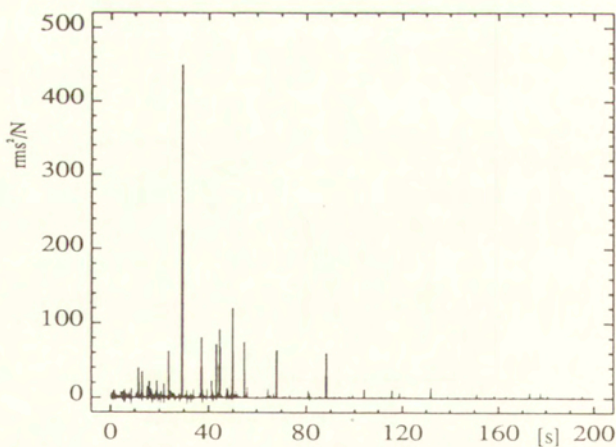
Rys. 41. Średnia wartość  $RMS^2$  przypadająca na jeden sygnał EA w czasie jednego naświetlania w funkcji numeru naświetlania dla próbki z blachy tytanowej.



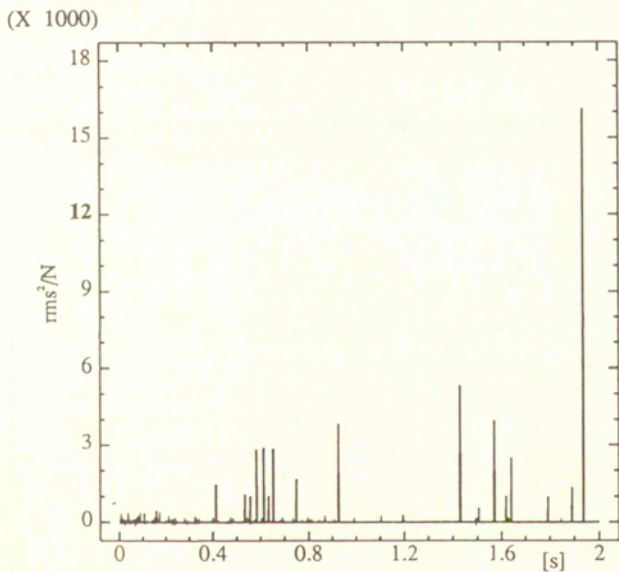
Rys. 42. Średnia wartość  $RMS^2$  przypadająca na jeden sygnał EA w czasie jednego naświetlania w funkcji numeru naświetlania dla próbki z blachy kwasoodpornej.



Rys. 43. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia, po drugim skanowaniu, próbki tytanowej.

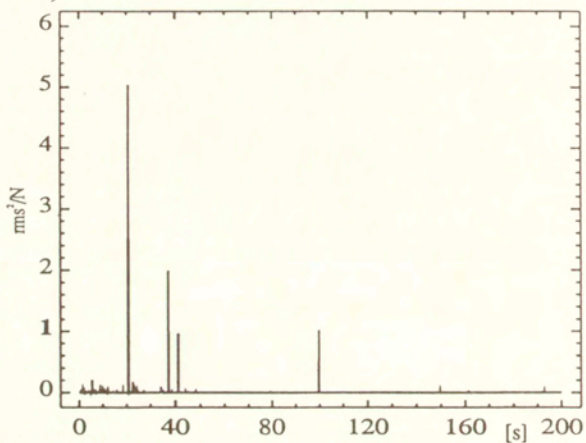


Rys. 44. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia, po czwartym skanowaniu, próbki tytanowej.



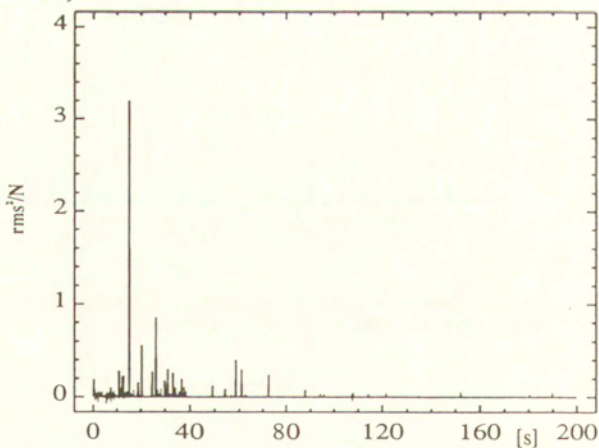
Rys. 45. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia, po dziesiątym skanowaniu, próbki tytanowej.

(X 1000)

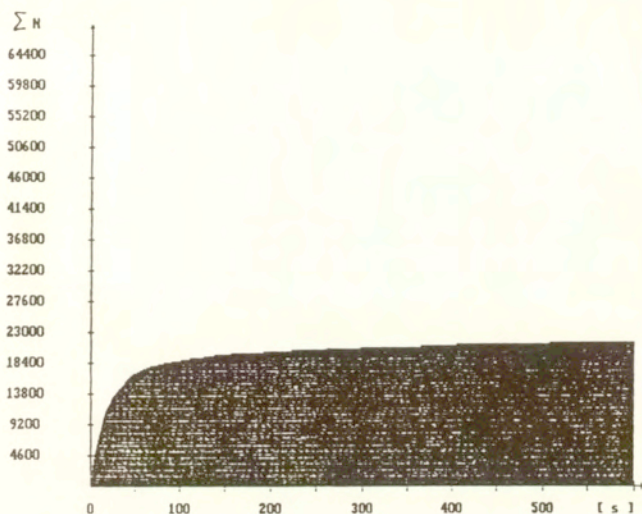


Rys. 46. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia, po trzecim skanowaniu, próbki z blachy kwasoodpornej.

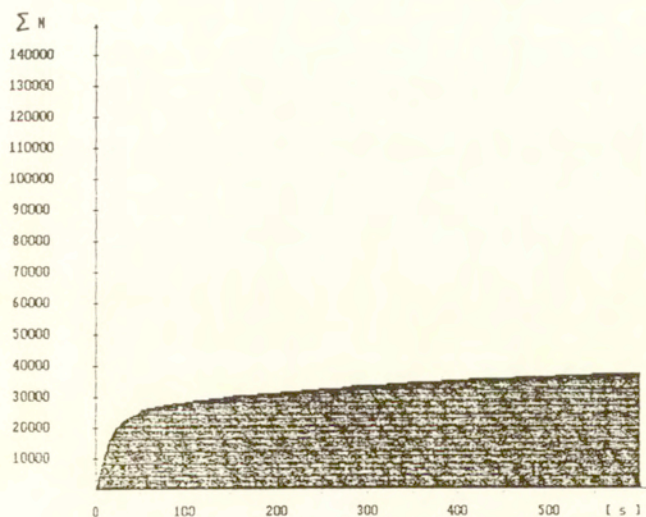
(X 1000)



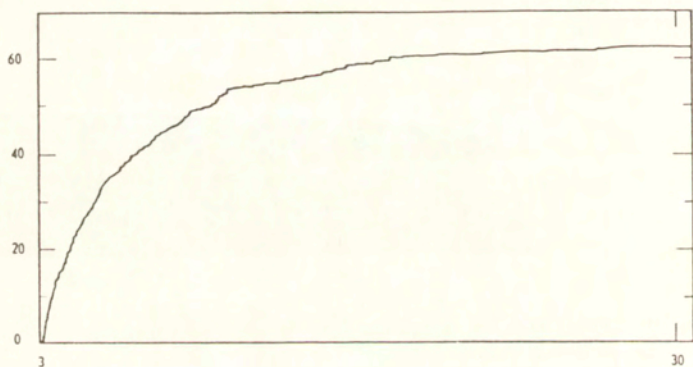
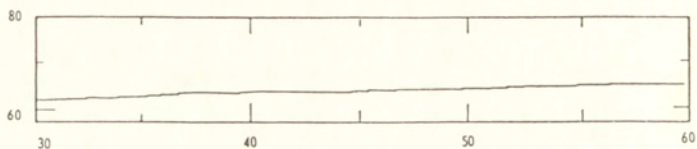
Rys. 47. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia, po piątym skanowaniu, próbki z blachy kwasoodpornej.



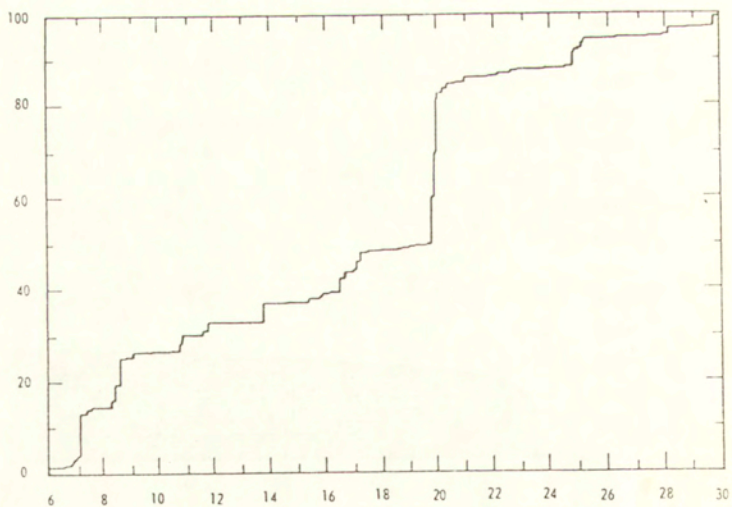
Rys. 48. Suma zliczeń sygnałów EA w próbce tytanowej po piątym naswietleniu w funkcji czasu chłodzenia.



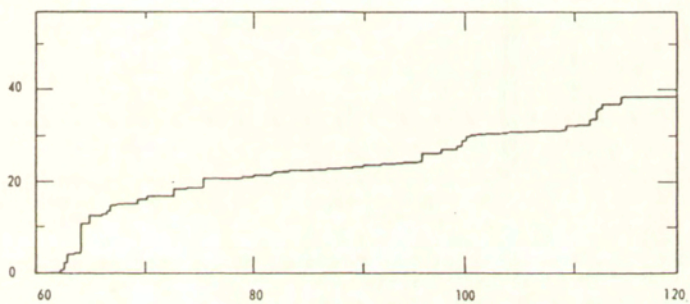
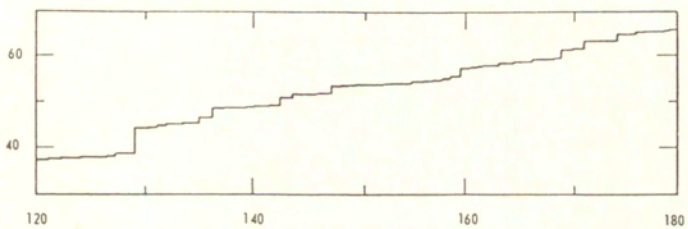
Rys. 49. Suma zliczeń sygnałów EA w próbce z blachy kwasoodpornej po szóstym naswietleniu w funkcji czasu chłodzenia.



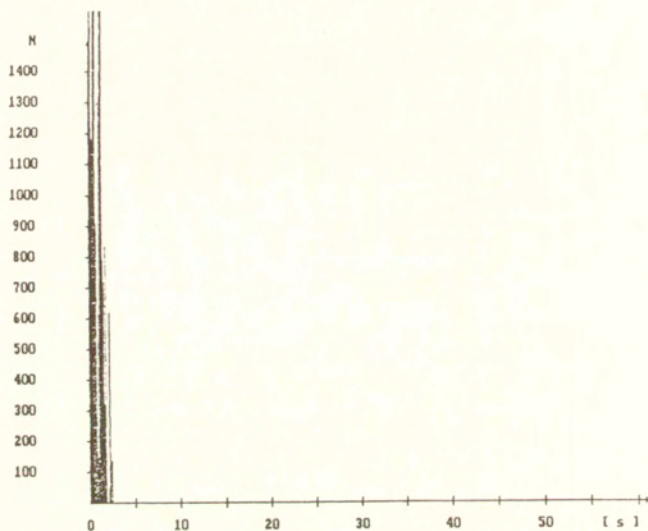
Rys. 50. Suma zliczeń sygnałów EA w czasie pierwszej godziny po zakończeniu spawania.



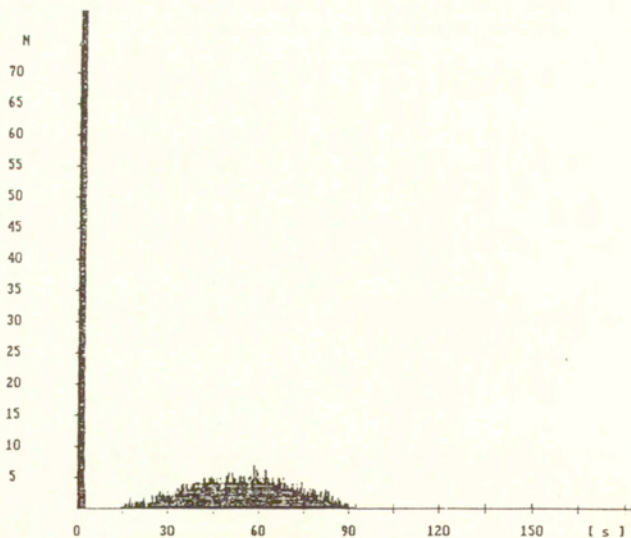
Rys. 51. Suma zliczeń sygnałów EA w czasie od 6 do 30 godzin po zakończeniu spawania.



Rys. 52. Suma zliczeń sygnałów EA w czasie od pierwszej do trzeciej godziny po zakończeniu spawania.

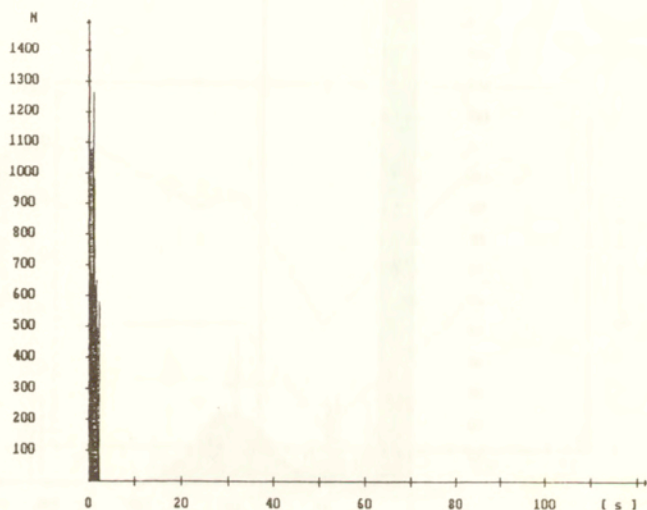


Rys. 53. Tempo EA w płytce duralowej d2 po szóstym naświetleniu z prędkością 1.5 m/min.

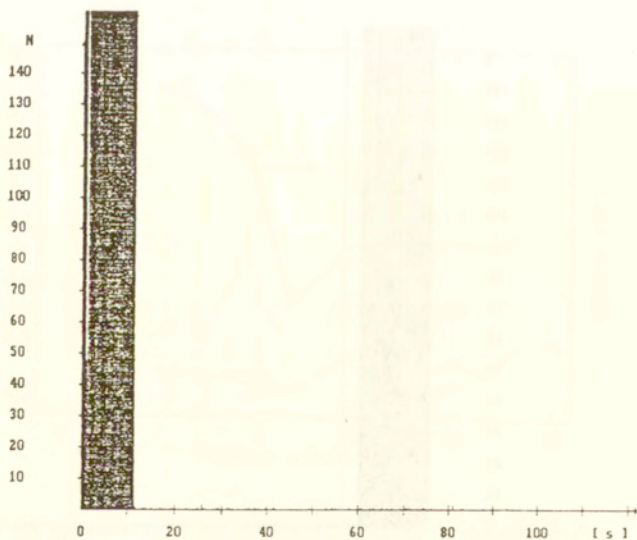


Rys. 54. Tempo EA w płytce duralowej d2 po dziewiątym naświetleniu z prędkością 1.5 m/min.

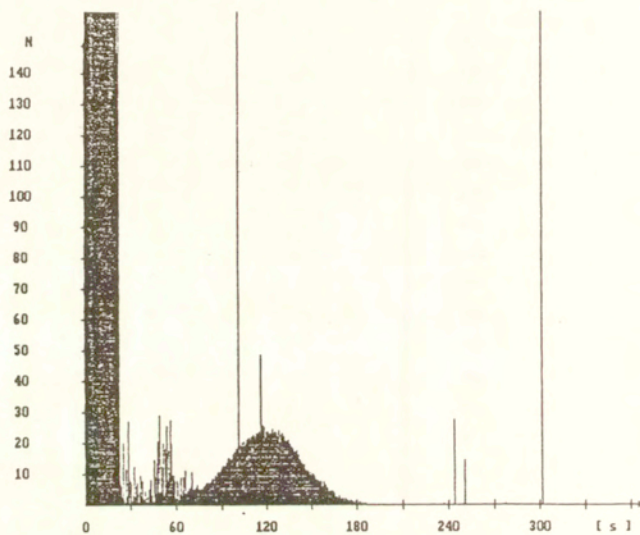




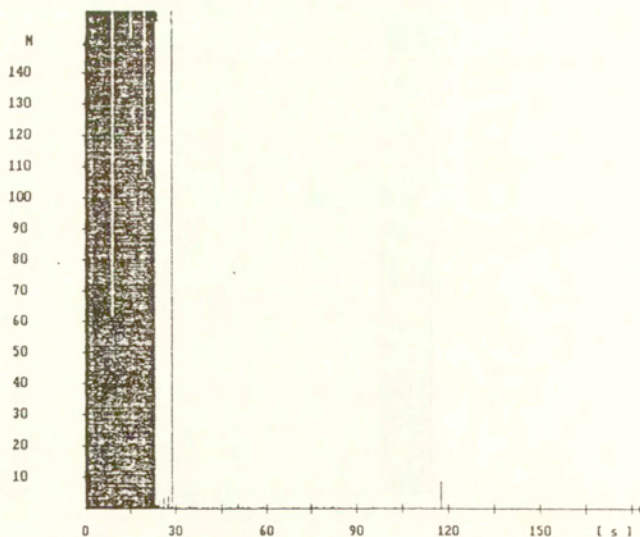
Rys. 55. Tempo EA w płytce duralowej d2 po dziesiątym naświetleniu z prędkością 1.5 m/min.



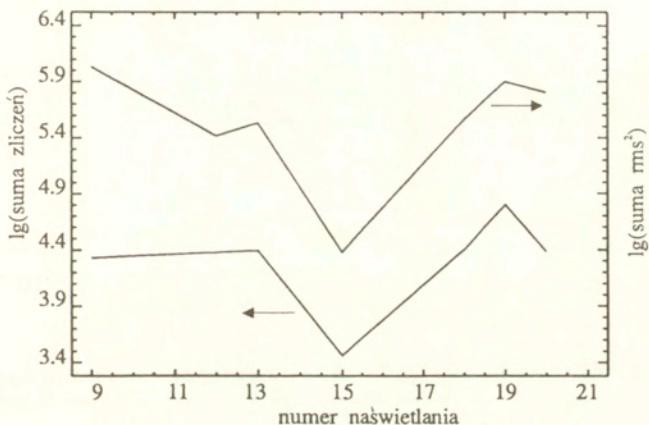
Rys. 56. Tempo EA w płytce duralowej d3 po trzecim naświetleniu z prędkością 0.5 m/min.



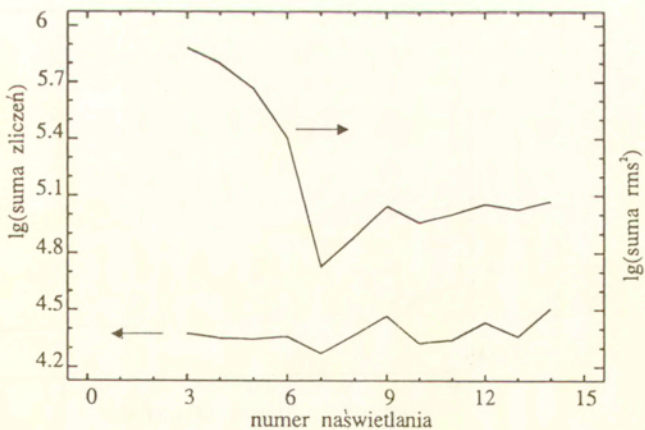
Rys. 57. Tempo EA w płytce duralowej d3 po pierwszym naświetleniu z prędkością 0.25 m/min.



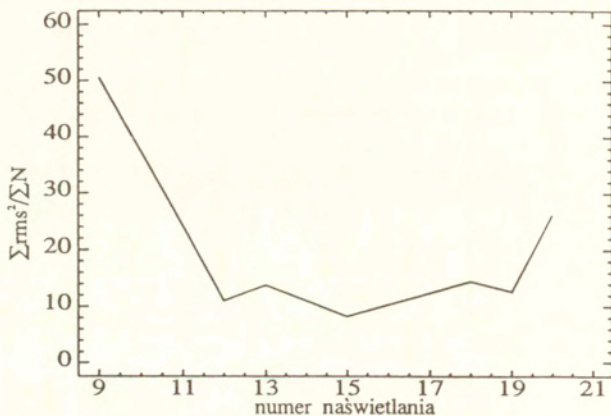
Rys. 58. Tempo EA w płytce duralowej d3 po drugim naświetleniu z prędkością 0.25 m/min.



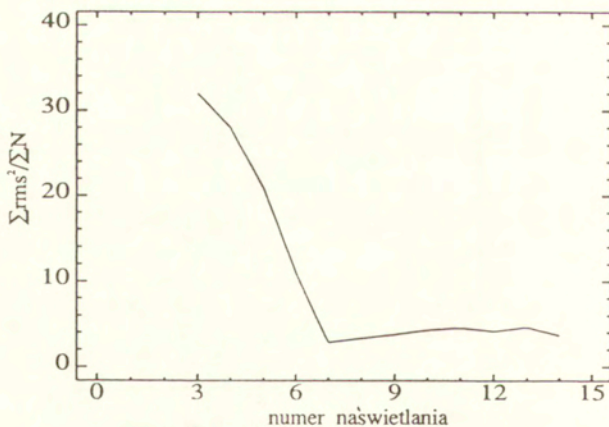
Rys. 59. Logarytm dziesiętny z sumy zliczeń oraz logarytm dziesiętny z sumy kwadratów RMS w funkcji ilości naświetleń w próbce d1 z blachy duralowej.



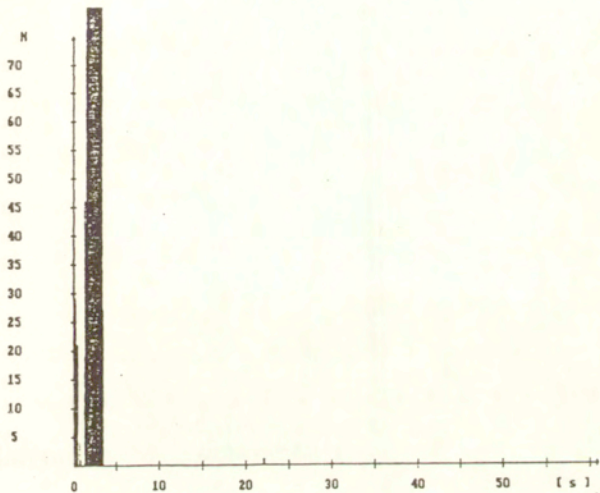
Rys. 60. Logarytm dziesiętny z sumy zliczeń oraz logarytm dziesiętny z sumy kwadratów RMS w funkcji ilości naświetleń w próbce d2 z blachy duralowej.



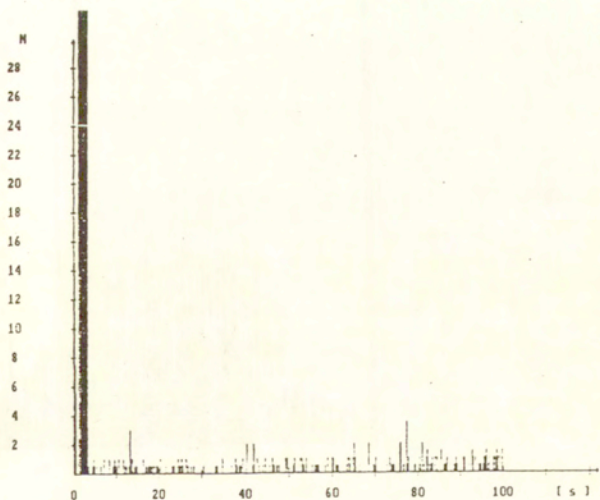
Rys. 61. Średnia wartość  $RMS^2$  przypadająca na jeden sygnał EA w czasie jednego naświetlania w funkcji numeru naświetlania dla próbki d1 z blachy duralowej.



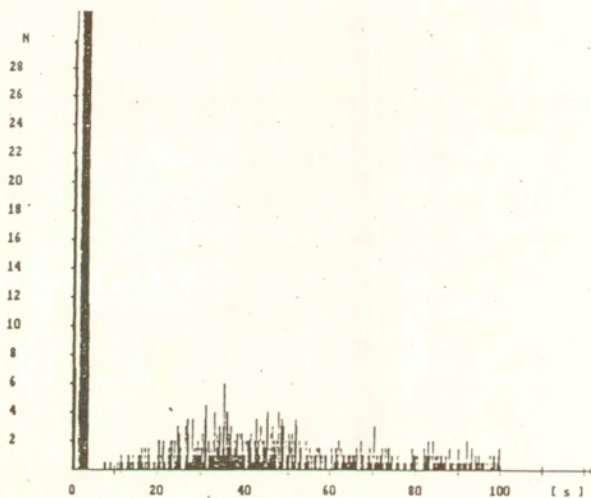
Rys. 62. Średnia wartość  $RMS^2$  przypadająca na jeden sygnał EA w czasie jednego naświetlania w funkcji numeru naświetlania dla próbki d2 z blachy duralowej.



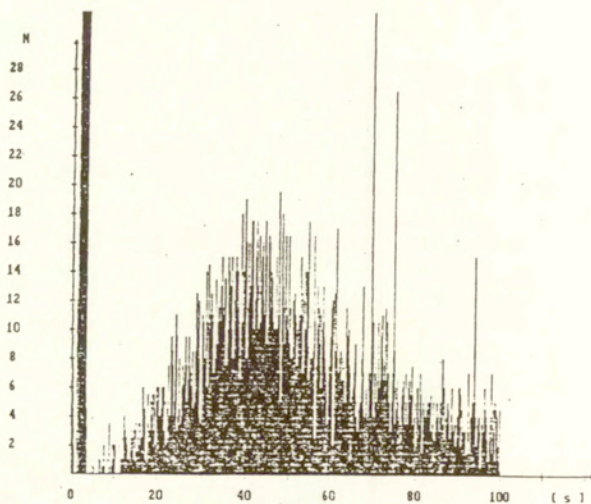
Rys. 63. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po trzecim naświetlaniu) w funkcji czasu



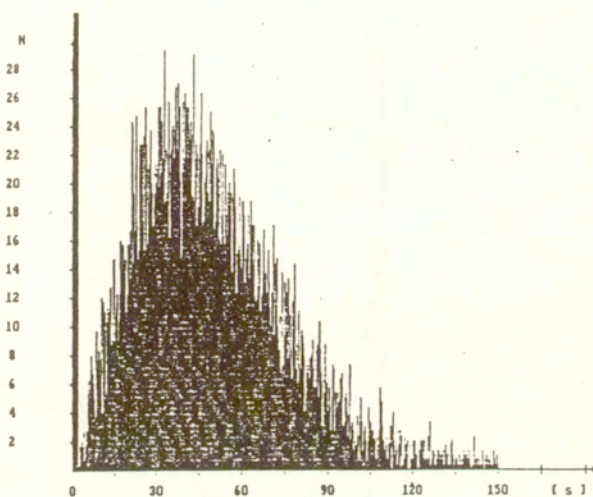
Rys. 64. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po czwartym naświetlaniu) w funkcji czasu



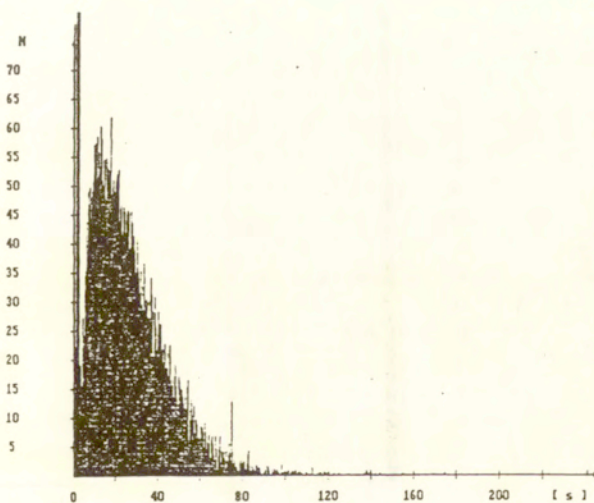
Rys. 65. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po piątym naświetlaniu) w funkcji czasu



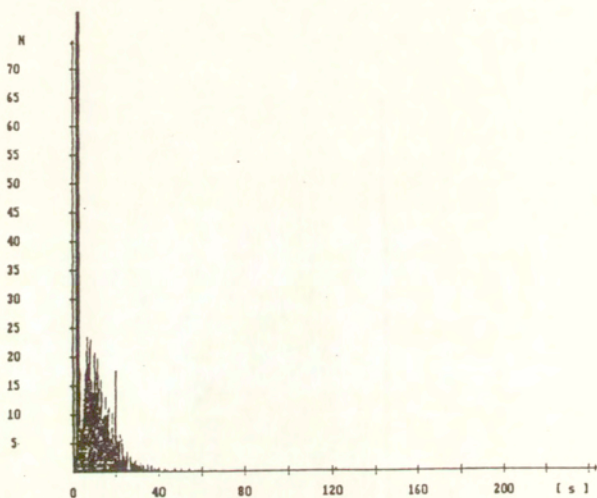
Rys. 66. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po szóstym naświetlaniu) w funkcji czasu



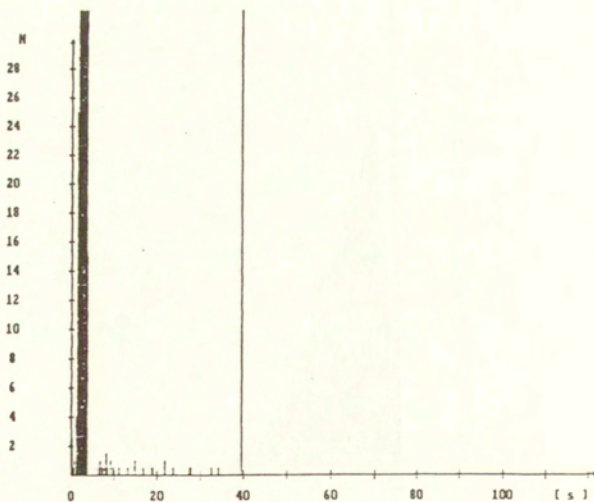
Rys. 67. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po siódmym naświetlaniu) w funkcji czasu



Rys. 68. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po ósmym naświetlaniu) w funkcji czasu

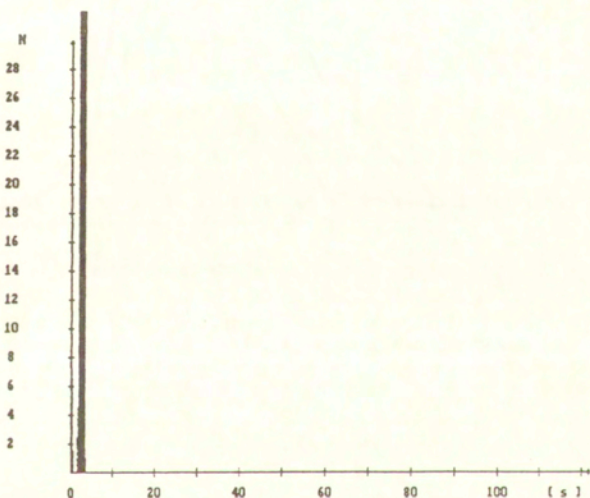


Rys. 69. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po dziewiątym naświetlaniu) w funkcji czasu

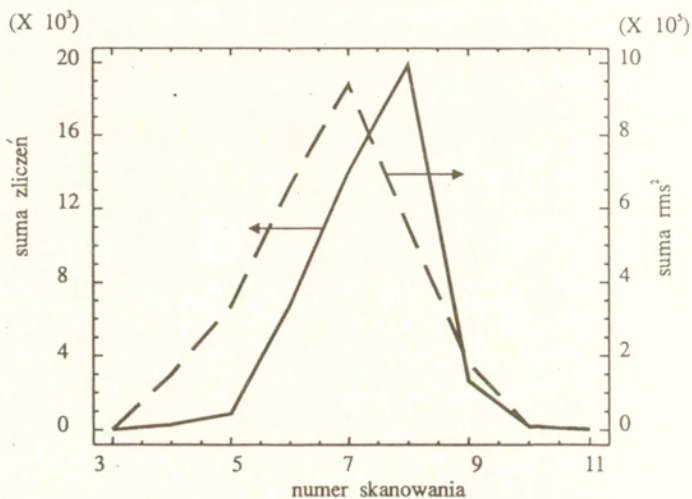


Rys. 70. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po dziesiątym naświetlaniu) w funkcji czasu

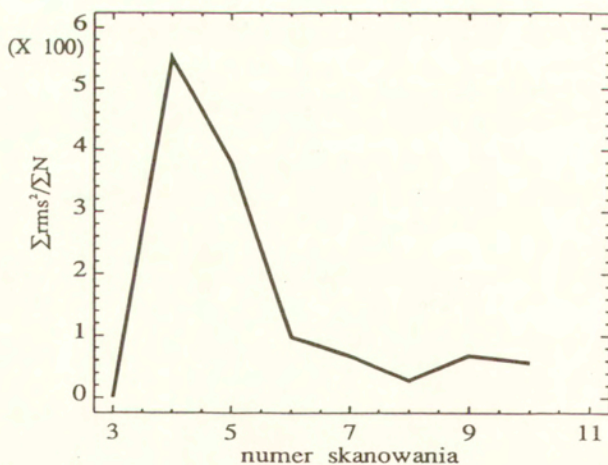




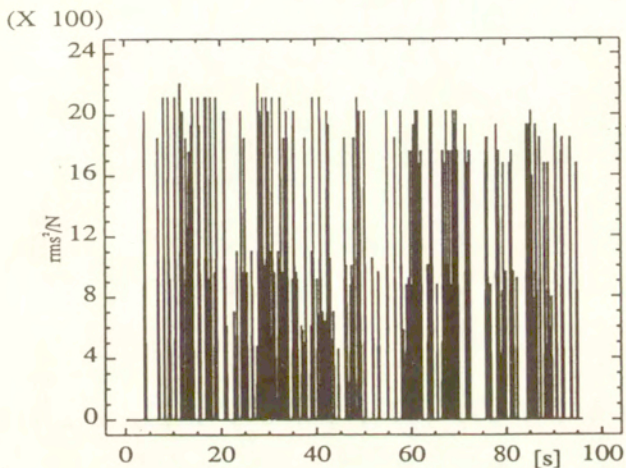
Rys. 71. Tempo EA w próbce d4 z blachy duralowej (po jedenastym naświetlaniu) w funkcji czasu



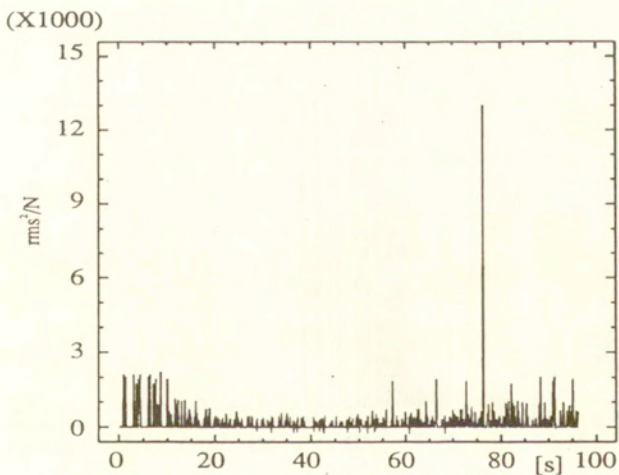
Rys. 72. Suma zliczeń i suma kwadratów RMS w funkcji numeru skanowania dla próbki d4.



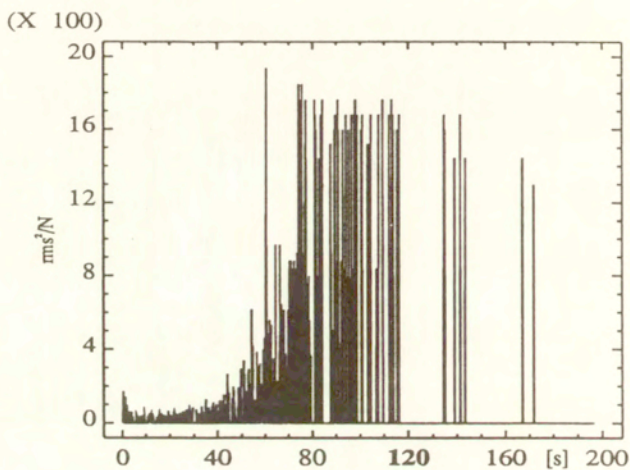
Rys. 73. Średnia energia impulsów EA w funkcji numeru skanowania dla próbki d4.



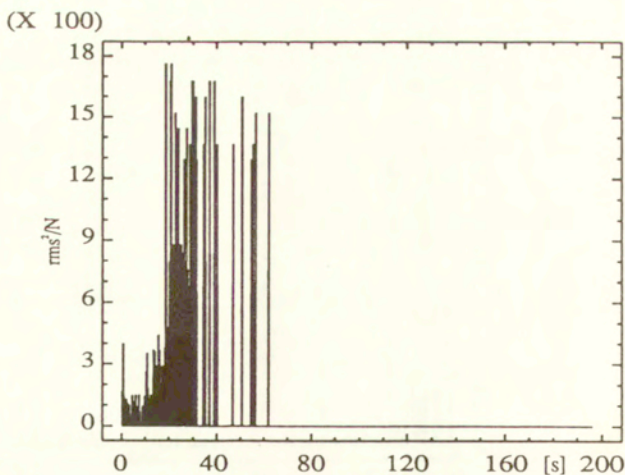
Rys. 74. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia próbki d4 po piątym naświetlaniu.



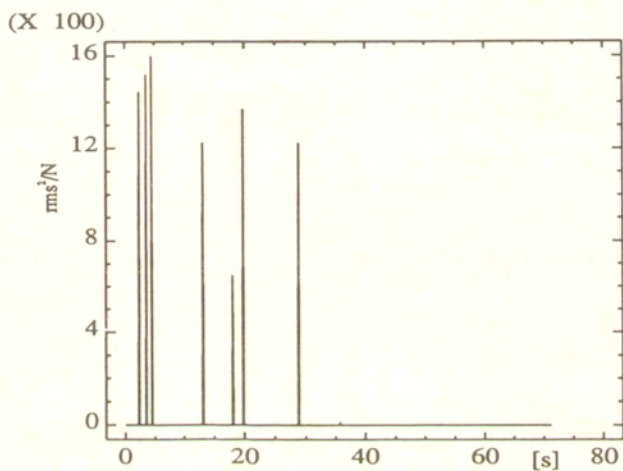
Rys. 75. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia próbki d4 po szóstym naświetlaniu.



Rys. 76. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia próbki d4 po ósmym naświetlaniu.



Rys. 77. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia próbki d4 po dziewiątym naświetlaniu.



Rys. 78. Średnia energia impulsów EA w trakcie chłodzenia próbki d4 po dziesiątym naświetlaniu.