

## 2. PROGNOZOWANIE WŁASNOŚCI ZMĘCZENIOWYCH TERMOPLASTÓW.

### 2.1. Uzasadnienie i zakres podjętej problematyki.

Możliwości prognozowania własności zmęczeniowych są ważnym czynnikiem usprawniającym projektowanie konstrukcji a przede wszystkim ułatwiają wstępną kwalifikację materiału na elementy obciążane zmęczeniowo. Dla tworzyw sztucznych problem ten jest szczególnie istotny z uwagi na:

- złożony wpływ wielu czynników na wyniki badań własności zmęczeniowych polimerów i utrudnienia tych badań [2,3]
- brak opracowanych metod przyspieszonego badania wytrzymałości zmęczeniowej tworzyw sztucznych i małą ilość prac dotyczących korelacji między własnościami zmęczeniowymi a wytrzymałością doraźną.

Proponowane kryteria wynikają z analizy korelacji między charakterystykami zmęczeniowymi a własnościami przy quasistatycznym rozciąganiu i zginaniu próbek z karami dla 18 termoplastów. Badane tworzywa występują w różnych stanach fizycznych i reprezentują typowe struktury nadmolekularne polimerów. Mimo, że rozpatrywane zagadnienie aktualnie wydaje się praktycznie ważniejsze w odniesieniu do tworzyw zbrojonych to jednak do badań wytypowano niewzmocniane termoplasty z uwagi głównie na aspekty poznawcze. Różnorodność stanów fizycznych i cech struktury badanych tworzyw stwarza bowiem podstawy do uogólniania wniosków odnośnie zmęczeniowego zachowania się polimerów. Uzyskane informacje mogą być przydatne przy wyjaśnianiu przyczyn zmęczeniowego zniszczenia spoiw wysokowytrzymałych kompozytów. Ponadto udział termoplastów w całkowitej produkcji tworzyw sztucznych stale wzrasta. Nowe sposoby modyfikacji chemicznej i fizycznej rozszerzają perspektywy stosowania tych materiałów, których produkcja jest względnie tania i mało energochłonna.

Własności zmęczeniowe określono metodą Wöhlera w jednakowych dla wszystkich tworzyw warunkach, opisanych w pkt.1.3

pracy.

## 2.2. Parametry prognozujące wytrzymałość zmęczeniową

Najbardziej ściśle korelację zachodzą między własnościami termoplastów przy doraźnym rozciąganiu a ich wysokocyklową wytrzymałością zmęczeniową  $Z_{go}$  i  $Z_{gj}$  trwałą, bądź umowną określoną na bazie  $10^7$  cykli.

Parametrami prognozującymi tą wytrzymałość mogą być :

- względne wytrzymałości zmęczeniowe

$$K_{mo} = Z_{go}/R_m \quad \text{i} \quad K_{mj} = Z_{gj}/R_m \quad (2.1)$$

- współczynniki odporności zmęczeniowej

$$K_{ro} = Z_{go}/\sigma_r \quad \text{i} \quad K_{rj} = Z_{gj}/\sigma_r \quad (2.2)$$

- odkształceniowe współczynniki zmęczenia

$$K_{eo} = \epsilon_{zo}/\epsilon_{kr} \quad \text{i} \quad \epsilon_{zj} = \epsilon_{zj}/\epsilon_{kr} \quad (2.3)$$

W powyższych wzorach ( rys.2.1) oznaczono przez :

$R_m$  - wytrzymałość doraźną jako naprężenie zrywające <sup>$\sigma_r$</sup>  dla tworzyw kruchych lub granicę plastyczności  $\sigma_{pl}$  dla ciągliwych,

$\sigma_r$  - rzeczywiste naprężenie zrywające (dla tworzyw kruchych można posługiwać się pozornymi).

$\epsilon_{kr}$  - odkształcenie krytyczne przy rozciąganiu przy czym  $\epsilon_{kr} = \epsilon_f$  dla kruchych i  $\epsilon_{kr} = \epsilon_{pl}$  dla tworzyw ciągliwych.

$\epsilon_z$  - odkształcenie maksymalne tworzywa podczas zmęczenia przy naprężeniach odpowiadających wytrzymałości zmęczeniowej odpowiednio  $Z_{go}$  i  $Z_{gj}$ .

Indeksy przy symbolach własności zmęczeniowych dotyczą :



- o - zginania przy cyklu wahadłowym
- j - zginania z rozciąganiem przy cyklu odzerowo-tętniącym.

Zbadane zależności parametrów prognozujących od stanu fizycznego określonego różnicą między temperaturą pokojową ( $T_0 = 293 \pm 3 \text{ K}$ ) a temperaturą zeszklenia tworzywa  $T_g$ , przedstawione na rys. 2.2, dostarczają następujących spostrzeżeń. Współczynnik odporności zmęczeniowej - nieznacznie rosnący wraz z obniżaniem się temperatury zeszklenia tworzyw - jest najskuteczniejszym parametrem prognozującym wytrzymałość zmęczeniową termoplastów. Dla 18 badanych tworzyw średnia wartość  $K_{\text{vo}} = 0,131$  z 19 % współczynnikiem zmienności  $S_n$  zaś analogicznie  $K_{\text{rj}} = 0,175$  przy  $S_n = 15 \%$ .

Po odrzuceniu wyników wyskakujących dla 14 tworzyw średnia wartość  $K_{\text{vo}} = 0,121$  przy  $S_n = 12 \%$  natomiast  $K_{\text{rj}} = 0,164$  przy  $S_n = 10 \%$ . Odształceniowy współczynnik zmęczenia wykazuje największą przypadkowość wartości i silną zależność od prędkości doraźnego rozciągania która istotnie wpływa na wartość odształcenia na granicy plastyczności tworzywa. Zależności  $K_{\text{eo}}$  i  $K_{\text{ej}}$  od temperatury zeszklenia z 75 do 80 % stopniem korelacji można estymować prostą wg. rys. 22.c.

Przedstawiona na rys. 2.3, zależność względnych trwałości podkrytycznych  $n_{\text{ko}}$  i  $n_{\text{kj}}$  (wzór 1.18) od parametru ciągliwości (wzór 3.3.2.) dostarcza informacji dla przewidywania przebiegu etapu rozwoju zniszczenia zmęczeniowego tworzyw na podstawie własności określonych w próbach rozciągania quasistycznego. Możliwości prognozowania własności zmęczeniowych w oparciu o badania krótko-trwałe a w szczególności przewidywania postaci zniszczenia przy tego rodzaju obciążeniach rozszerzają, przedstawione w pkt. 3.3.2. pracy, korelacje między wskaźnikami przebiegu zmęczenia i pękania polimerów.

### 2.3. Zastrzeżenia odnośnie stosowania metody

Podstawowym warunkiem prawidłowego przewidywania

własności zmęczeniowych tą metodą jest przeprowadzenie prób doraźnego rozciągania zgodnie ze wskazówkami w pkt. 3.3.1. pracy. Najogólniej chodzi o taki dobór prędkości rozciągania doraźnego, by maksymalnie ujawnić zdolność tworzywa do wyciągania na zimno z szyjkowaniem bądź do quasi-kruchego zerwania między granicą uszkodzeń a granicą plastyczności. Współczynnik odporności zmęczeniowej wykazuje największe odchylenia od ustalonych reguł dla tworzyw dla których przy rozciąganiu występują złomy rozdzielnice i słabo ciągliwe bądź długie równomierne wyciąganie bez szyjkowania.

Parametry prognozujące wytrzymałość zmęczeniową nie są skuteczne w przypadkach gdy proces zmęczenia zachodzi w wyjątkowych warunkach specyficznie oddziaływujących na jego przebieg. Takimi przypadkami mogą być np: zgodność częstotliwości obciążeń z częstotliwością odpowiadającą maksimum współczynnika tarcia wewnętrznego tworzywa, szczególne warunki odprowadzenia ciepła generowanego przez próbkę przy zmęczeniu itp.

Należy podkreślić, że ustalone korelacje wynikają z badań w których stosowano takie same próbki wiósełkowe typu 2 wg PN-68/C-08934 dla wszystkich przebiegów obciążeń, zmęczenia, rozciągania doraźnego i przy wymuszaniu pęknięcia.

#### 2.4. Ocena przydatności termoplastów na elementy konstrukcyjne obciążane zmęczeniowo.

Wykorzystując wnioski z badań nad możliwościami prognozowania własności zmęczeniowych tworzyw dokonano porównawczej oceny przydatności poszczególnych grup termoplastów na elementy pracujące przy długotrwałych cyklicznie zmiennych obciążeniach. Przyjęcie kryteriów takiej oceny jest problemem złożonym. Z jednej strony typowym niewzmacnianym polimerom nie można stawiać takich samych wymagań odnośnie bezwzględnych wartości własności wytrzymałościowych jak materiałom metalicznym. Materiały na bazie polimerów



winy być bowiem stosowane w tych przypadkach gdy ich specyficzne własności fizyczne i chemiczne są najlepiej wykorzystywane bądź wręcz niezastąpione. Z drugiej zaś strony istnieją potrzeby przynajmniej orientacyjnego porównania zdolności do przenoszenia cyklicznie zmiennych obciążeń przez tworzywa sztuczne i metale.

Ponadto nie sposób jest ustalić wielkości, które mogłyby dostarczać w pełni uniwersalnych wskaźników przydatności konstrukcyjnej materiałów.

Przykładowo, w pewnych przypadkach wysoka wartość modułu (sprężystości, dynamicznego etc) może być korzystną cechą tworzywa. W innych natomiast przypadkach pożądana może być duża jego podatność.

Uwzględniając powyższe przyjęto 8 punktową skalę oceny wartości wysokocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej /wg tabeli 2.2/ Wskaźnik 8 otrzymują tworzywa o wartości  $Z_{g0} \geq 50 \text{ MPa}$  oraz  $Z_{g2} \geq 100 \text{ MPa}$ , przy czym  $Z_{g2}$  oznacza tutaj wytrzymałość zmęczeniową przy cyklu o parametrach  $\sigma_m = 2 \sigma_a$ .

Przyjęcie takich wartości wynika z założenia upraszczającego iż wysokiej jakości stale konstrukcyjne o wytrzymałości doraźnej  $R_m \geq 500 \text{ MPa}$  osiągają  $Z_{g0} = (250 \div 300 \text{ MPa})$ . Wysoko wytrzymałe tworzywa termoplastyczne (bądź kompozyty na ich bazie) osiągają  $R_m \geq 100 \text{ MPa}$ .

Przy analogicznej jak stale przydatności na elementy obciążane zmęczeniowo tworzywami te winny wykazywać  $Z_{g0} \geq 50 \text{ MPa}$  przyjmując, że najpowszechniejszym kryterium oceny przydatności konstrukcyjnej materiałów jest wytrzymałość doraźna. Natomiast 100 MPa jako dolny limit najwyższej oceny  $Z_{g2}$  wynika z przyjęcia, że wysokiej jakości stale wykazują współczynnik wrażliwości na asymetrię cyklu  $\psi = 0,2 \div 0,3$ . Bazując na uproszczonych wykresach Smitha lub Haigha można przy warunku  $\sigma_m = 2 \sigma_a$  wyprowadzić zależność  $Z_{g2} = 3Z_{g0}(1+2\psi)$  skąd dla  $Z_{g0} = 50 \text{ MPa}$ ,  $\psi = 0,25$  otrzymuje się  $Z_{g2} = 100 \text{ MPa}$ . Należy zauważyć, że przyjęta skala daje 5-cio punktową ocenę wytrzymałości zmęczeniowej typowych niewzmocnionych termoplastów dla których stwierdzono maksymalne wartości

$Z_{go}$  nie przekraczające 25 MPa (dla niestarzonego Tarnamidu blokowego T-B). Ponadto wartość  $Z_{go} = 50$  MPa jako limit wskaźnika 8 rozpatrywanej przydatności, przy założeniu średniej gęstości właściwej termoplastów  $\rho = 1,25 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, daje tzw. właściwą wytrzymałość zmęczeniową tworzywa ( $Z_{go}/\rho$ ) analogiczną jak  $Z_{go} = 300$  MPa w przypadku stali.

W tab. 2.1. określono przyjmowane kryteria przydatności termoplastów na elementy konstrukcyjne obciążane zmęczeniowo. Wartości wskaźników wielkości stosowanych jako te kryteria, wykazywane przez poszczególne tworzywa zestawiono w tabeli 2.3.

## 2.5. Podsumowanie

Spostrzeżenia dotyczące zależności parametrów prognozujących własności zmęczeniowe i wynikające z oceny przydatności konstrukcyjnej termoplastów potwierdzają wnioski z pkt. 1.4 odnośnie efektów umocnienia i zniszczenia zmęczeniowego. Wykazujące najsilniejsze efekty umocnienia (wartości  $n_0$  i  $\alpha$ ), częściowo krystaliczne termoplasty w stanie szklistym wymuszonej elastyczności oraz lepkosprężystym wykazują najwyższe bezwzględnie wartości wytrzymałości zmęczeniowej. Ponieważ tworzywa te cechują równocześnie wysokie względne wytrzymałości zmęczeniowe takie cechy fizyczne struktury polimerów należy uznać za najkorzystniejsze dla przebiegu zmęczenia w niemodyfikowanych termoplastach. Najniekorzystniejszą dla własności zmęczeniowych jest bezpostaciowa struktura termoplastów w stanie szklistym kruchym. Przy niskich bądź przeciętnych bezwzględnie wartościach wytrzymałości zmęczeniowych tworzywa te wykazują najniższe wartości względnych wytrzymałości zmęczeniowych.

Decyduje o tym słaba zdolność struktury tych tworzyw do umocnienia zmęczeniowego (parametr  $n_0$ ), wysoka ogólnie intensywność mechanizmów zniszczenia przy zmęczeniu w porównaniu do pełzania ( $\beta$ ) powiększona dodatkowo silną struktu-



ralną koncentracją amplitudy naprężenia ( $\alpha$ ). Wysokokrystaliczne termoplasty w stanie kauczukopodobnym przy niskich bądź przeciętnych bezwzględnych wartościach wytrzymałości zmęczeniowej wykazują najwyższe względne wytrzymałości zmęczeniowe (co prawda przy mniejszej granicznej liczbie cykli) oraz bardzo korzystny efekt nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Odpowiadają temu przeciętne bądź niskie wartości ogólnego współczynnika trwałości zmęczeniowej ( $n_0$ ), najniższe wartości współczynnika wzrostu intensywności mechanizmów zniszczenia przy zmęczeniu w porównaniu do pełzania ( $\beta$ ) oraz średnie wartości parametru strukturalnego oddziaływania amplitudy naprężenia ( $\alpha$ ) przy najwyższych wartościach jednostki kinetycznej zniszczenia  $\gamma_p$  pod działaniem obciążeń statycznych.

Modyfikacja struktury w celu poprawy własności zmęczeniowych, winna powodować pewną optymalną niejednorodność jego struktury. W strukturze tej obok składników odpornych mechanicznie winny występować fazy o dużej giętkości molekularnej zdolne do relaksacji i łagodzenia efektów koncentracji naprężeń. Wymagania te w znacznym stopniu spełniają między innymi kopolimery tworzyw termoplastycznych. Przybliżona stałość współczynników odporności zmęczeniowej w szerokim przedziale stanów fizycznych świadczy o tym, że lokalnie w mikroobszarach struktury tworzywa procesy zniszczenia zmęczeniowego zachodzą z intensywnością porównywalną do zniszczenia w chwili zerwania przy obciążeniach doraźnych. Dzieje się tak mimo, iż w pierwszym przypadku makroskopowo określone naprężenia są wielokrotnie mniejsze, natomiast w drugim przypadku tworzywa wykazują krańcowo kruche i ciągliwe złomy przy zerwaniu.

Potwierdza to tezę o niejednorodności przebiegu zmęczenia w objętości tworzywa oraz wskazuje na potrzebę kształtowania odpowiednio niejednorodnej struktury polimeru sprzyjającej mechanizmom jego umocnienia.

## Literatura

- [1.] A.Litak - Ocena własności zmęczeniowych wybranych tworzyw sztucznych - Praca doktorska w redakcji końcowej. Politechnika Krakowska.
- [2.] M.Nowak - Wybrane zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej poliamidu. - Prace naukowe IMiMT Politechniki Wrocławskiej nr 11, S.Mon.3, Wrocław 1972.
- [3.] J.Zawadzki - Problemy wyteżenia i zużycia polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych - PWN, Warszawa 1978.

Tab.2.1. Zastosowane kryteria oceny przydatności termoplastów

### A.Podstawowe przy klasyfikacji i wyborze tworzyw.

- $Z_{go}$  -wartość wysokocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej przy zginaniu wahadkowym, umownej na bazie  $10^7$  cykli bądź trwałej.
- $G_o$  -wartość wskaźnika oceny (wg tab.2.2) przydatności na elementy obciążane przy cyklach zmęczeniowych obustronnych.
- $Z_{g2}$  -wartość wysokocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej dla cyklu o parametrach  $\sigma_m = 2 \sigma_a$  i określona jak  $Z_{go}$ .
- $G_d$  -wartość wskaźnika oceny (wg tab.2.2) przydatności na elementy obciążane zmęczeniowo przy cyklach jednostronnych.
- $K_{mo} = Z_{go} / R_m$  -względna wytrzymałość zmęczeniowa jako orientacyjny wskaźnik obniżenia wytrzymałości tworzywa przy długotrw.obciąż.cyklicznych w porównaniu do doraźnych.

### B.Drugoplanowe.

- $\Delta T_{ko}$  -wartość średnich przyrostów temperatury samowzbudnej w cyklu wahadkowym na granicy przejścia od zniszczenia mechanicznego do zniszczenia zmęczeniowego cieplnego; wzrost  $\Delta T_{ko}$  jest na ogół negatywnym czynnikiem dla warunków pracy konstrukcji.
- $S_w (= Z_{go5} / Z_{go})$  -współczynnik wzrostu wytrzymałości w zakresie średniocyklowym w stosunku do wysokocyklowego;  $Z_{go5}$  -wytrzymałość zmęczeniowa na bazie  $10^5$  cykli.
- $n_{ko}$  -średnia wartość względnej trwałości podkrytycznej przy zginaniu wahadkowym określona wg wzoru 1.18 powinna być uwzględniona przy ustalaniu współczynnika bezpieczeństwa zmęczeniowego dla tworzyw.
- $E_T$  - przybliżona wartość modułu sprężystości przy rozciąg.



Tab. 2.2. Zależność wskaźników  $G_o$  i  $G_d$  od wartości  $Z_{go}$  i  $Z_{g2}$ .

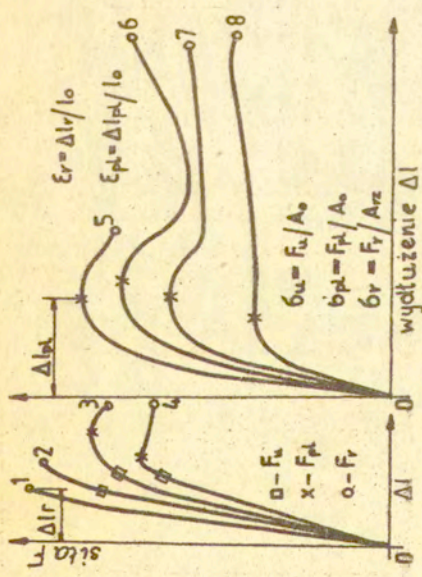
Wartość $G_o$ i $G_d$		1	2	3	4	5	6	7	8
Dolny limit wielkości									
$Z_{go}$	MPa	6,5	9,0	13	18	25	35	50	>50
$Z_{g2}$	MPa	9,5	14	21	30	44	66	100	>100
Wrażliwość na asy- metrię cyklu $\psi$		0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	<0,25

W oparciu o te wartości  $\psi$  określono graniczne wartości  $Z_{g2}$

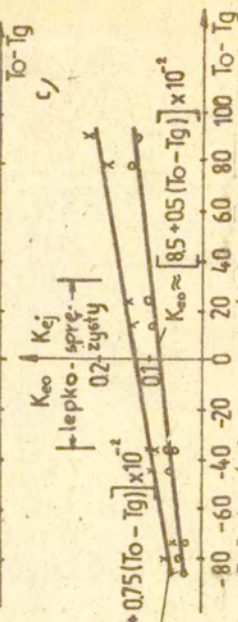
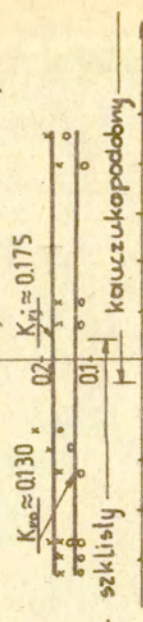
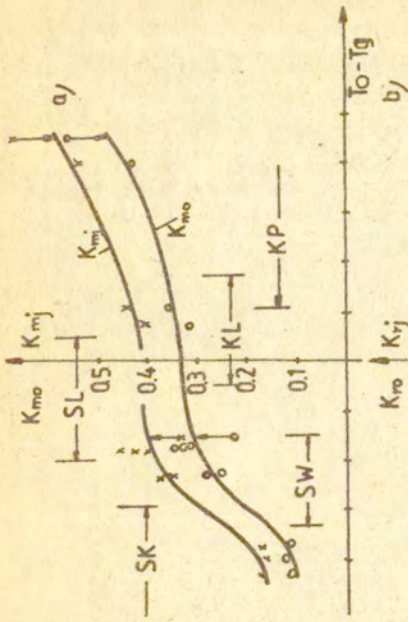
Tab. 2.3. Wartości wskaźników oceny przydatności (wg tab. 2.1 i tab. 2.2) termoplastów na elementy konstrukcyjne obciążane zmęczeniowo.

Tworzywa oznaczono symbolami wg tab. 1.3.

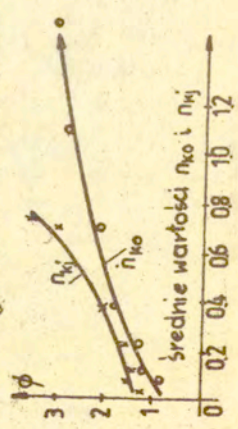
Lp.	Two- rzy- wo	Kryteria podstawowe					Kryteria drugoplanowe			
		$Z_{go}$ MPa	$G_o$	$Z_{g2}$ MPa	$G_d$	$K_{mo}$	$T_{ko}$ K	$S_w$	$n_{ko}$	$E_r$ MPa
1	PM1w	8,8	2	14,0	3	0,12	2,6	1,7	<0,03	3620
2	PM1p	6,5	2	11,1	2	0,11	2,3	1,7	<0,03	3060
3	PM1	8,6	3	14,7	3	0,12	2,5	1,6	<0,03	3290
4	PCW	5,7	1	10,7	2	0,10	3,2	2,0	0,05	3220
5	PSo	6,3	1	11,5	2	0,11	1,8	2,9	0,03	3390
6	PSw	7,6	2	12,8	2	0,14	3,0	2,4	0,05	3040
7	KSE	10,0	3	15,8	3	0,21	5,2	2,6	0,15	2640
8	T-27	15,1	4	21,4	4	0,32	20	1,5	0,80	1760
9	T-30	13,4	4	19,9	3	0,33	18	1,6	0,90	1400
10	T-B	16,7	4	24,8	4	0,26	21	1,5	0,25	1970
11	PP	11,0	3	16,3	3	0,30	14	1,2	>1,0	1710
12	KEP	9,6	3	13,7	2	0,35	12	1,2	>1,0	1240
13	PE	6,1	1	8,2	1	0,42	10	1,2	>1,0	410
14	PFE	10,5	3	13,5	2	0,57	12	1,1	>1,0	850
15	KFD	21,4	5	-	-	0,39	16	1,8	0,20	2390
16	I-25	25,7	6	-	-	0,23	23	1,3	0,07	5530



Rys. 2.1. Wykresy rozciągania termoplastów.  
 $\sigma_u$  - granica uszkodzeń,  $\sigma_{pl}$  - granica plastycz.,  
 $\sigma_r$  - naprężenie zrywające,  $A_0$  - pierwotny przekrój próbki,  $A_z$  - przekrój w miejscu zerwania,  $l_0$  - wyjściowa baza pomiarowa próbki.



Rys. 2.2. Zależności parametrów prognozujących wyrz. zmęż. od temp. wskaźnika stanu fizycz. t. s. ( $T_0 - T_g$ ). Oznaczenia stanów wg tab. 1.2.



Rys. 2.3. Zależności między wielkościami  $\phi$  a  $n_{ko}$  i  $n_{kj}$ .