

## WPLYW OPERACJI TECHNOLOGICZNYCH NA ZACHOWANIE SIĘ DUŻYCH CIENKOŚCIENNYCH KONSTRUKCJI SKRZYNKOWYCH

ZENON GÓRECKI i RYSZARD PISKORSKI (GDAŃSK)

W pracy przedstawiono wpływ operacji technologicznych prostowania bezudarowego oraz operacji przecinania i wymiany elementów na zachowanie się konstrukcji skrzynkowych, wielkość naprężeń i odkształceń. Teorię zilustrowano obliczeniami rzeczywistej konstrukcji statku.

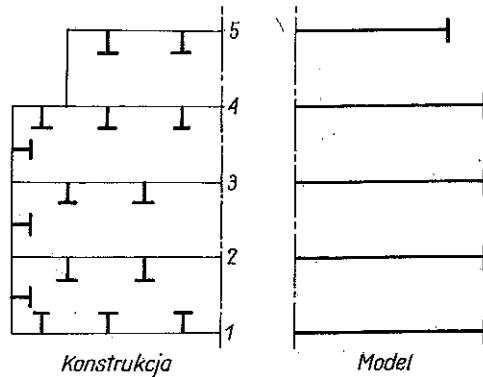
### 1. WSTĘP

Podczas prefabrykacji (budowy) dużych konstrukcji skrzynkowych (np. kadłuby statków zamkniętych) istnieje konieczność prostowania dużych powierzchni i elementów konstrukcyjnych oraz wymiany niektórych fragmentów konstrukcji. Operacje te nie pozostają bez wpływu na stan naprężeń wewnętrznych w konstrukcji oraz mogą spowodować znaczne odkształcenia konstrukcji jako całości.

Celem niniejszej pracy jest oszacowanie wpływu tych operacji na zachowanie się konstrukcji i wielkość odkształceń. Przyjęto następujące operacje technologiczne: a) prostowanie bezudarowe powodujące skurcz termiczny, b) przecinanie elementów konstrukcji powodujące lokalną relaksację naprężeń. Uwzględniono wpływ obciążenia zewnętrznego w postaci stałego momentu gnącego działającego na konstrukcję podczas przeprowadzanych operacji technologicznych.

### 2. MODEL TEORETYCZNY

Do rozważań przyjęto cienkościenną konstrukcję skrzynkową wieloobwodową, którą podzielono na segmenty. Na rys. 1 przedstawiono przekrój poprzeczny konstrukcji i przyjętego modelu. Konstrukcja składa się z uzbrojonych ciągłych pokładów połączonych burtami. Obciążenie dane w postaci stałego momentu gnącego w konstrukcji przenoszone jest w przekroju poprzecznym przez siły podłużne w pokładach i burtach. Model teoretyczny



Rys. 1. Schemat zamiany konstrukcji rzeczywistej na model segmentowy

takiej konstrukcji sprowadza się do modelu belki warstwowej [2]. Przyjmując jednak, że konstrukcja jako całość odkształca się zgodnie z hipotezą płaskich przekrojów, wymuszoną sztywnymi grodziami na obu końcach, można pominąć oddziaływanie poszczególnych segmentów między sobą. W ten sposób poszczególne segmenty przenoszą tylko siły osiowe, których moment jest równy danemu momentowi gnącemu.

Uwzględniono nieliniową charakterystykę wytrzymałościową poszczególnych segmentów (utrata stateczności, osiągnięcie granicy plastyczności). Obciążenia wywołane procesem technologicznym sprowadzają się do obciążeń samozrównoważonych na końcach konstrukcji.

### 3. WYPROWADZENIE PODSTAWOWYCH ZWIĄZKÓW KONSTITUTYWNYCH

Hipoteza płaskich przekrojów jest postaci

$$(3.1) \quad \varepsilon_R = Az_R + B,$$

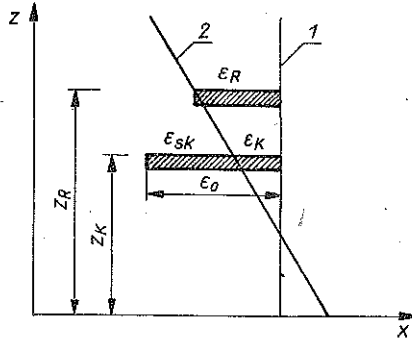
gdzie  $R$  oznacza numer segmentu,  $z_R$  współrzędną środka ciężkości segmentu w przyjętym układzie współrzędnych oraz  $A$ ,  $B$  współczynniki, które należy wyznaczyć.

Odkształcenia wywołane naprężeniami w segmentach według prawa Hooke'a są następujące:

$$(3.2) \quad \varepsilon_R = \frac{\sigma_R}{E_R} = \frac{P_R}{E_R F_R},$$

gdzie  $E_R$  oznacza moduł Younga materiału  $R$ -tego segmentu,  $P_R$  siłę w  $R$ -tym segmencie oraz  $F_R$  pole powierzchni przekroju poprzecznego  $R$ -tego segmentu.

Podczas prostowania bezudarowego  $k$ -tego segmentu w pierwszej fazie występuje relaksacja naprężeń, a następnie skurcz termiczny  $\varepsilon_0$  [1]. W wyniku



Rys. 2. Schemat deformatcji wskutek skurczu termicznego

wzajemnego oddziaływania sąsiednich segmentów, w segmencie  $k$ -tym pojawia się odkształcenie końcowe  $\varepsilon_{sk}$  (rys. 2).

Przesunięcie końcowe  $k$ -tego elementu wynosi

$$(3.3) \quad \varepsilon_k = \varepsilon_0 - \varepsilon_{sk}.$$

Stąd skurcz termiczny w tym segmencie wywołuje siłę

$$(3.4) \quad P_{sk} = \varepsilon_{sk} E_k F_k,$$

i w pozostałych segmentach odpowiednio

$$(3.5) \quad P_R = \varepsilon_R E_R F_R, \quad R \neq k.$$

Warunki samorównoważenia

$$(3.6) \quad \begin{cases} \sum_{\substack{R=1 \\ R \neq k}}^n P_R = P_{sk}, \\ \sum_{\substack{R=1 \\ R \neq k}}^n P_R z_R = P_{sk} z_k, \end{cases}$$

prowadzą do wzorów

$$(3.7) \quad \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n E_i F_i z_i^2 & \sum_{i=1}^n E_i F_i z_i \\ \sum_{i=1}^n E_i F_i z_i & \sum_{i=1}^n E_i F_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{0k} z_k \\ P_{0k} \end{Bmatrix},$$

gdzie  $P_{0k}$  oznacza dany skurcz termiczny

$$(3.8) \quad P_{0k} = \varepsilon_0 E_k F_k,$$

gdzie  $n$  oznacza liczbę segmentów oraz  $k$  numer segmentu poddanego prostowaniu bezударowemu.

Obliczając współczynniki  $A$  i  $B$  możemy wyznaczyć rozkład sił w poszczególnych segmentach

$$(3.9) \quad P_R = E_R F_R (A z_R + B), \quad R = 1, 2, \dots, n,$$

przy czym dla  $R = k$  mamy dodatkowo

$$(3.10) \quad P_{sk} = P_{0k} - P_k.$$

Obliczone siły muszą spełniać następujące ograniczenia:

$$(3.11) \quad \min(P_{pl_j}, P_{E_j}) \leq P_j \leq P_{pl_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

gdzie ( $P_{pl_j}$  oznacza graniczną siłę „plastyczną” w segmencie oraz  $P_{E_j}$  graniczną siłę Eulerowską, przy której segment traci stateczność. Z chwilą gdy w jakimkolwiek segmencie nie jest spełniony powyższy warunek, należy wprowadzić poprawkę i rozwiązać dodatkowo układ równań dla przyrostów  $\Delta A$  i  $\Delta B$ :

$$(3.12) \quad [M] \begin{Bmatrix} \Delta A \\ \Delta B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta P_s z_s \\ \Delta P_s \end{Bmatrix},$$

gdzie  $[M]$  oznacza macierz współczynników (jak w równaniu (3.7))  $s$  numer segmentu, w którym nie jest spełniony warunek (3.11), oraz  $\Delta P_s$  poprawkę na siłę obliczoną ze wzoru (3.11), którą przedstawiamy w postaci

$$(3.13) \quad \Delta P_s = -(P_s + P_{Es}) \quad \text{lub} \quad \Delta P_s = P_{pl_s} - P_s.$$

Na podstawie wzoru (3.9) obliczamy przyrosty sił

$$(3.14) \quad \Delta P_R = E_R F_R (\Delta A z_R + \Delta B) \quad R = 1, 2, \dots, n, \quad R \neq s.$$

W rezultacie siły w segmentach przyjmują wartości następujące:

$$(3.15) \quad \begin{aligned} Q_R &= P_R + \Delta P_R, & R &= 1, 2, \dots, n, \\ Q_s &= P_s + \Delta P_s, & R &\neq s, \end{aligned}$$

a współczynniki określające odkształcenie końcowe

$$(3.16) \quad \begin{aligned} \tilde{A} &= A + \Delta A, \\ \tilde{B} &= B + \Delta B. \end{aligned}$$

Operacje powyższe należy przeprowadzać tak długo, aż spełniony zostanie warunek (3.11) dla wszystkich segmentów. Proces ten jest szybko zbieżny.

Ponieważ proces prostowania bezударowego składa się z dwóch etapów: 1) relaksacji naprężeń wskutek ogrzewania oraz 2) skurczu termicznego, wobec tego obliczenia sił przy prostowaniu  $T$ -tego segmentu muszą być poprzedzone rozwiązaniem układu równań (3.12) z poprawką

$$(3.17) \quad \Delta P_T = Q_T,$$

gdzie  $Q_T$  oznacza siłę w  $T$ -tym segmencie pozostałą po poprzednich operacjach, a po sprawdzeniu warunku (3.11) ponowne rozwiązanie układu (3.12) z poprawką

$$(3.18) \quad \Delta P_T = P_{0T},$$

gdzie  $P_{0T}$  oznacza siłę wynikającą ze skurczu termicznego obliczoną według wzoru (3.8).

Operacje technologiczne polegające na przecinaniu segmentów powodują tylko relaksacje naprężeń. Obliczenia sił przeprowadzamy więc tylko według wzoru (3.17) wraz ze sprawdzeniem warunku (3.11) z pominięciem wzoru (3.18).

Dodatkowo po każdym etapie operacji technologicznych można obliczyć ugięcie w środku kadłuba według wzoru:

$$(3.19) \quad w = \frac{\tilde{A}L^2}{8E},$$

gdzie  $L$  oznacza długość konstrukcji (kadłuba),  $\tilde{A}$  wynikową wartość współczynnika  $A$  z równania (3.1) odpowiadającą końcowemu stanowi (linia  $\mathcal{Q}$  na rys. 2) wyznaczoną według wzoru (3.16) oraz  $E$  moduł sprężystości Younga.

Konstrukcja poddana procesom technologicznym znajduje się często pod wpływem obciążenia zewnętrznego, determinującego wstępne siły w poszczególnych segmentach. W procesie technologicznym siły te należy traktować tak samo, jak siły pozostałe po poprzednich operacjach (por. (3.18)) z zachowaniem warunku (3.11).

#### 4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Do analizy przyjęto konstrukcję kadłuba statku promowego o długości  $L = 150$  m, znajdującego się na wodzie spokojnej i posiadającego ciągłą nadbudówkę na całej długości obliczeniowej. W tabelicy 1 podane są

Tablica 1

Nr. segm.	$Z_R$ [m]	$F_R$ [m <sup>2</sup> ]	$P_E$ [MN]	$P_{pl}$ [MN]	$-P_{gr}$
1	0,85	0,5673	141,8	141,8	$-P_{pl}$
2	5,65	0,1518	38,0	38,0	$-P_{pl}$
3	8,6	0,5348	133,7	133,7	$-P_{pl}$
4	14,0	0,4326	83,6	108,2	$-P_E$
5	16,4	0,1688	11,7	42,2	$-P_E$
6	19,3	0,2648	13,1	26,2	$-P_E$
7	22,03	0,2309	17,0	57,7	$-P_E$
8	24,75	0,2326	34,2	58,2	$-P_E$
9	27,75	0,2139	34,3	53,5	$-P_E$
10	30,48	0,1404	19,0	35,1	$-P_E$

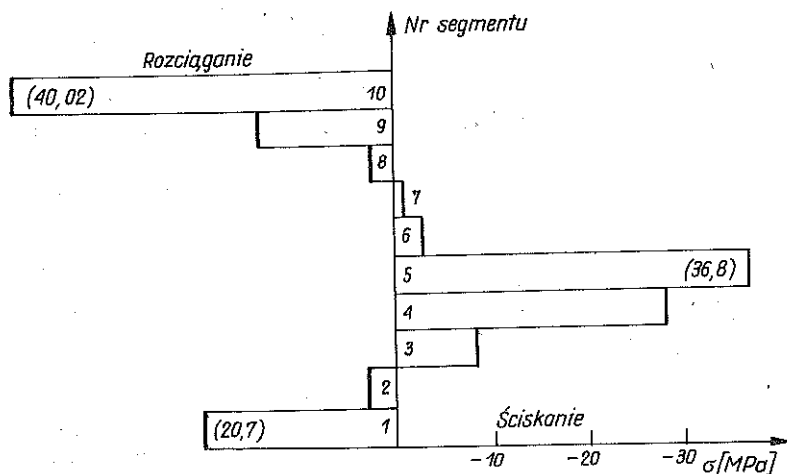
Przy obliczaniu  $P_{pl}$  przyjęto  $\sigma_{pl} = 250$  MPa.

charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe konstrukcji segmentowej, na którą podzielono kadłub, gdzie  $z_R$  oznacza odległość środka ciężkości  $R$ -tego segmentu od płaszczyzny podstawowej (rys. 2),  $F_R$  pole powierzchni przekroju poprzecznego  $R$ -tego segmentu,  $P_{ER}$  siłę Eulerowską, przy której następuje utrata stateczności  $R$ -tego segmentu,  $P_{plR}$  granicę plastyczności  $R$ -tego segmentu ( $\sigma_{pl} = 250$  MPa) oraz  $P_E \leq P_{pl}$ .

Operacje technologiczne typu prostowania lub przecinania wykonywano jedynie na segmentach od nr 3 do 10 pozostawiając segmenty 1 i 2 znajdujące się w części zanurzonej kadłuba w stanie nienaruszonym.

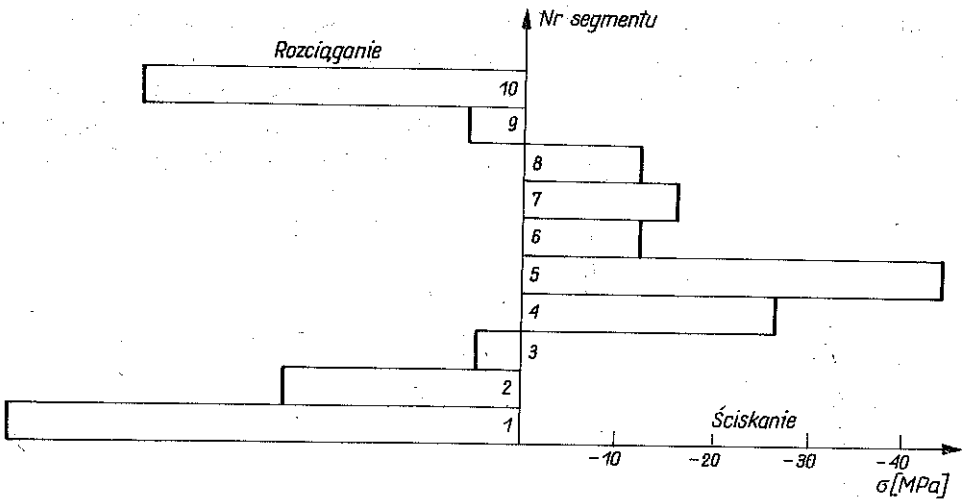
#### 4.1. Analiza wpływu prostowania bezударowego na rozkłady naprężeń

Operacje technologiczne polegały na prostowaniu kolejno segmentów od nr 6 do 10. Skurcz termiczny wywołany prostowaniem bezударowym przyjęto na poziomie  $0,2 \sigma_{pl}$ . Na rys. 3 i 4 przedstawiono końcowe rozkłady naprężeń w poszczególnych segmentach przy naprężeniach wstępnych  $\sigma_i = 0$  oraz przy liniowym rozkładzie naprężeń wstępnych na poziomie  $\sigma = 0,1 \sigma_{pl}$  w segmentach skrajnych.



Rys. 3. Rozkład naprężeń po prostowaniu segmentów nr od 6 do 10. Naprężenia wstępne  $\sigma_i = 0$ . Naprężenia termiczne:  $\sigma_i = 0,2 \sigma_{pl}$

Otrzymane rozkłady naprężeń pokazują naprężenia pozostałe w konstrukcji po prostowaniu. Charakterystyczne jest to, że prostowanie segmentów w ustalonej kolejności wprowadziło do kadłuba samozrównoważony układ sił taki, że rejony skrajne są zawsze rozciągane, a środkowe ściskane. Rozkłady te wynikają z obranego programu prostowania, który prowadzony był na konstrukcji rzeczywistej i wynikał z procesów technologicznych w trakcie budowy

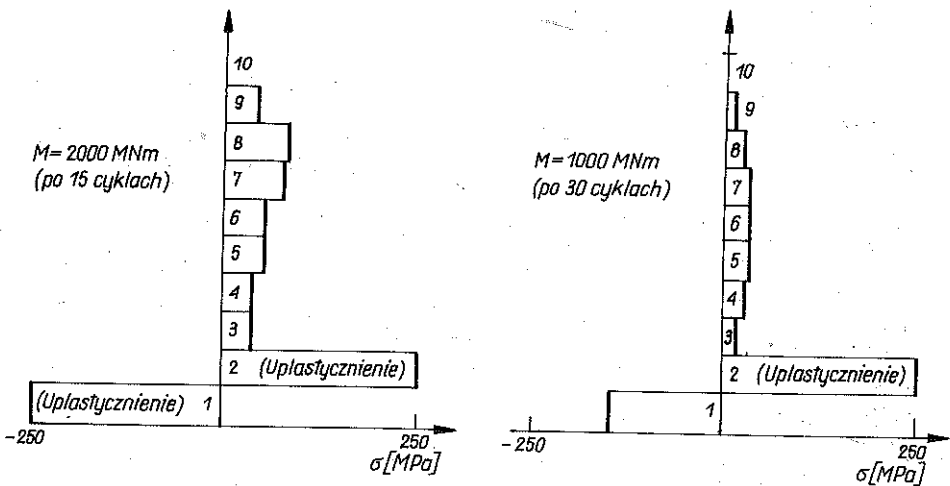


Rys. 4. Rozkład naprężeń po prostowaniu segmentów nr od 6 do 10. Naprężenia wstępne  $\sigma_1 = -\sigma_{10} = 0,1 \sigma_{pl}$ . Naprężenia termiczne  $\sigma_t = 0,2 \sigma_{pl}$ .

statku. Inne programy prostowania prowadzą na pewno do innych rozkładów naprężeń i można by znaleźć optymalny program z punktu widzenia końcowych rozkładów naprężeń.

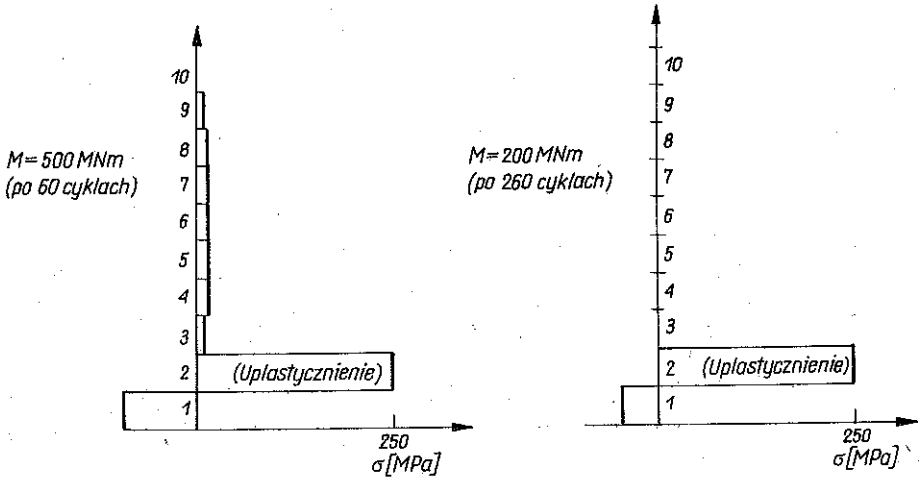
4.2. Analiza wpływu przecinania segmentów pod działaniem obciążenia zewnętrznego na rozkłady naprężeń i ugięć konstrukcji

Dużą liczbę zmian technologicznych, polegających na wycinaniu i wstawianiu elementów konstrukcyjnych zamodelowano operacją całkowitego prze-

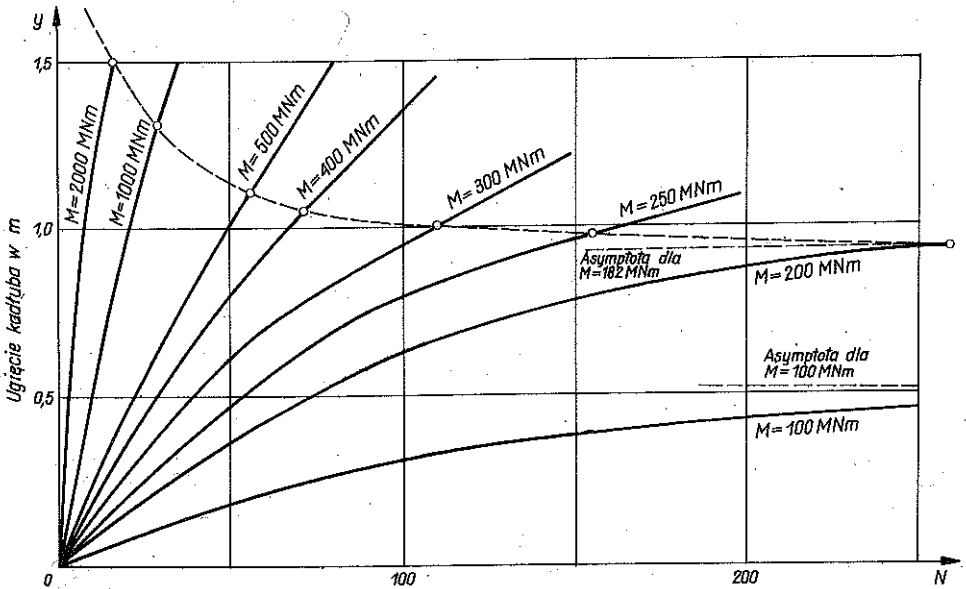


Rys. 5. Ustalone rozkłady naprężeń w segmentach po wielokrotnych zmianach technologicznych obejmujących segmenty od 3 do 10

cinania (wyłączania ze współpracy) poszczególnych segmentów kadłuba, a następnie wstawiania bez naprężeń wstępnych. Operacje te przeprowadzane dla segmentów w kolejności od nr 3 do 10 nazwano jednym cyklem zmian technologicznych. Analizę wpływu liczby cykli na rozkłady naprężeń i ugięcia kadłuba przeprowadzono w zależności od obciążenia zewnętrznego w postaci



Rys. 6. Ustalone rozkłady naprężeń w segmentach po wielokrotnych zmianach technologicznych obejmujących segmenty od 3 do 10

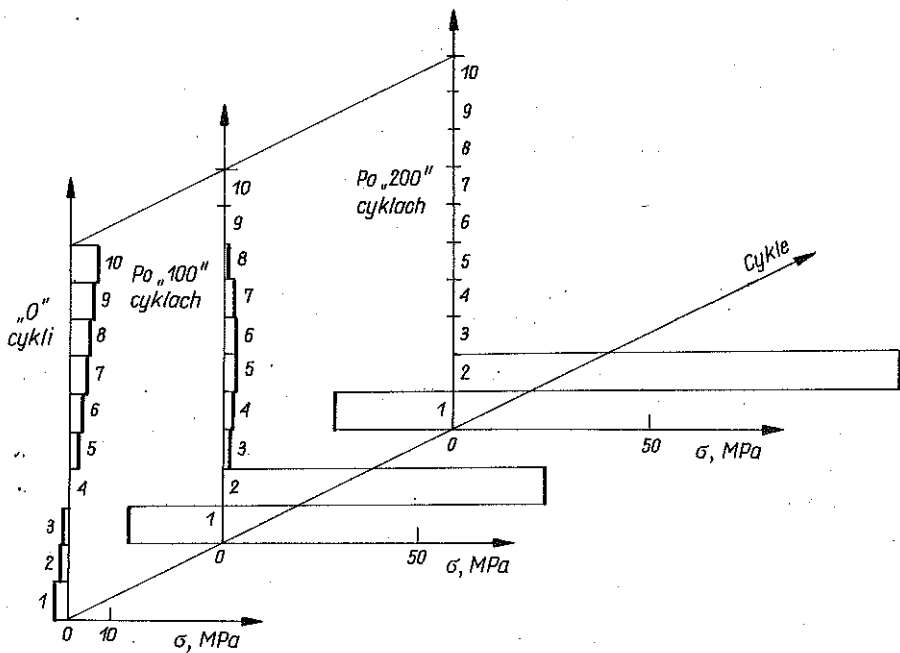


Rys. 7. Wzrost ugięć kadłuba w trakcie zmian technologicznych pod obciążeniem momentem gnącym  $M$



momentu gnącego zmieniającego się w przedziale od 100 do 2000 MNm, stałego w każdym cyklu.

Na rys. 5 i 6 przedstawiono ustalone rozkłady naprężeń w kadłubie po wielokrotnych zmianach technologicznych. Stwierdzono, że po określonej liczbie cykli, związanej z obciążeniem zewnętrznym, rozkłady naprężeń ustalają się na poziomie stałym, natomiast ugięcia zaczynają przyrastać w sposób liniowy. Zależność tę przedstawiono na rys. 7, na którym linią przerywaną zaznaczono graniczną liczbę cykli jako funkcję momentu gnącego. Krzywa ta ma asymptotę poziomą  $y = 0,9383$  m, odpowiadającą momentowi granicznemu  $M_{gr} = 182$  MNm. Obciążenie momentem niższym od  $M_{gr}$  daje ograniczone ugięcia po nieskończonej liczbie cykli i zależy od wartości tego momentu (np. dla  $M = 100$  MNm,  $y_{gr} = 0,508$  m). Zjawisko to przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Wzrost naprężeń w kadłubie podczas wielokrotnych zmian technologicznych przy obciążeniu momentem  $M = 100$  MNm

Widać, że już po 200 cyklach prawie znikają naprężenia w segmentach przecinanych i stąd dalsze przecinanie segmentów nie powoduje praktycznie zmian naprężeń w konstrukcji. Z wykresu na rys. 7 wynika oczywisty wniosek, że im większy moment obciąża konstrukcję, tym mniej cykli wywołuje duże ugięcia kadłuba. W związku z tym konieczne operacje technologiczne należy przeprowadzić przy możliwie najniższej wartości momentu gnącego.

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Powyższy, uproszczony model konstrukcji miał na celu udzielenie odpowiedzi, jaka jest przyczyna dużych deformacji konstrukcji w trakcie procesu budowy statku. Analiza ta wykazała że prostowanie konstrukcji nie ma istotnego wpływu na deformacje kadłuba jako całości. Natomiast duża liczba zmian technologicznych, polegających na wycinaniu i wstawianiu dużych elementów konstrukcji pod obciążeniem może spowodować znaczne odkształcenie konstrukcji.

## LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. Z. GÓRECKI, R. PISKORSKI, J. WIĘCKOWSKI, *Określenie rozkładów naprężeń w jednostce B 494/1 w aktualnym etapie budowy i dla warunków eksploatacji*, Instytut Okrętowy Polit. Gdańskiej, Praca Badawcza nr 1893/84, Gdańsk 1984.
2. Я. И. Короткин, В. А. Постнов, Н. Л. Сиверс, *Строительная механика корабля и теория упругости*, Издат. Судостроение, Ленинград 1968.

## РЕЗЮМЕ

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ  
НА ПОВЕДЕНИЕ БОЛЬШИХ ТОНКОСТЕННЫХ КОРОБОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В работе представлено влияние технологических операций безударного выпрямления, а также операций разрезания и обмена элементов на поведение коробочных конструкций, величину напряжений и деформаций. Теория иллюстрирована расчетами реальной конструкции корабля.

## SUMMARY

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS  
UPON THE BEHAVIOUR OF LARGE THIN-WALLED BOX STRUCTURES

The paper deals with the problem of the effects of such operations as shock-less plate levelling, cutting and replacing certain elements of box structures, upon the behaviour of such structures and the corresponding distribution of stresses and deformations. The general theory is illustrated by an example concerning an actual ferry-boat structure.

POLITECHNIKA GDAŃSKA  
INSTYTUT OKRĘTOWY

Praca została złożona w Redakcji w dniu 20 listopada 1986 r.