



## **Badania elementów żelbetowych wzmocnionych laminatami obciążonych wybuchowo. Część III. Wyniki badań płyt żelbetowych**

PAWEŁ PONETA<sup>1</sup>, AGNIESZKA GILUŃ<sup>1</sup>, JERZY JURCZUK<sup>1</sup>,  
PIOTR ŚWIEŻEWSKI<sup>1</sup>, ADAM STOLARSKI, GRZEGORZ BĄK,  
TADEUSZ BŁAŻEJEWICZ, ROMAN KRZEWIŃSKI,  
SŁAWOMIR ONOPIUK, RYSZARD REKUCKI,  
ZBIGNIEW SZCZEŚNIAK

<sup>1</sup>Mostostal Warszawa S.A., Biuro Analiz i Rozwoju,  
02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 11a, p.poneta@mostostal.waw.pl  
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, astolarski@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych płyt żelbetowych. Badania przeprowadzono dla elementów żelbetowych, zwykłych bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów wzmocnionych wysokowytrzymałościowymi powłokowymi laminatami z włókien aramidowych, szklanych i węglowych. Zasadniczą częścią pracy jest prezentacja wyników badań, na które składają się schematy mechanizmów zniszczenia oraz trwałe przemieszczenia płyt.

**Słowa kluczowe:** badania doświadczalne, obciążenie wybuchowe, elementy żelbetowe, płyty

### **1. Wprowadzenie**

Celem pracy jest prezentacja wyników badań doświadczalnych modeli płyt żelbetowych obciążonych wybuchowo. Badania przeprowadzono dla elementów żelbetowych zwykłych bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów wzmocnionych wysokowytrzymałościowymi powłokowymi laminatami z włókien aramidowych, szklanych i węglowych.

Zasadniczą częścią pracy jest prezentacja wyników badań, na które składają się schematy mechanizmów zniszczenia oraz trwałe przemieszczenia płyt.

## 2. Zestawienie wyników badań

Przeprowadzono 39 eksperymentów. Badania przeprowadzono dla elementów bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów żelbetowych wzmocnionych wysokowytrzymałościowymi taśmowymi lub powłokowymi/płytowymi laminatami z włókien aramidowych, szklanych i węglowych. Badaniu podlegały po trzy elementy każdego rodzaju. Wykonano dwie serie badań: seria I dotyczyła sposobu podparcia na całym obwodzie płyty, a seria II — podparcia obwodowego o zwiększonej sztywności lub podparcia punktowego w narożach płyty na podkładkach stalowych 150 mm × 150 mm o grubości 50 mm.

Zastosowano materiał wybuchowy dynamit E4G4H o masach ładunku od 200 g do 600 g. Ładunek materiału wybuchowego był umieszczany centralnie, na przekładce stalowej 200 mm × 200 mm o grubości 50 mm lub był bezpośrednio przykładany do badanego elementu.

Rejestrowaniu podlegały przemieszczenia trwałe oraz mechanizm zniszczenia elementów.

W zależności od rodzaju elementu, sposobu jego wzmocnienia i wielkości ładunku materiału wybuchowego zaobserwowano występowanie następujących efektów: (A) na górnej (obciążanej) powierzchni płyty: (1) wgniecenia betonu pod stalową płytą przekładkową; (2) powierzchniowe/pasmowe wykruszenie betonu; (3) krater w betonie; (4) przebicie betonu; (5) zarysowanie o małych szerokościach rys; (B) na dolnej powierzchni płyty: (6) powierzchniowe wykruszenie betonu; (7) krater o głębokościach do 80% wysokości przekroju; (8) wielowarstwowe odłamy; (9) spęcznienie betonu pod laminatem, (10) zarysowanie betonu o bardzo dużych szerokościach rys; (11) wybicie betonu; (13) bardzo małe ugięcia trwałe dla płyt podpartych na całym obwodzie; (14) bardzo duże ugięcia trwałe dla płyt podpartych w narożach; (15) powierzchniowe odspojenia laminatu (w tym na całej powierzchni); (16) pasmowe odspojenia laminatu; (17) rozerwanie laminatu; (8) odślönienie/wygięcie prętów zbrojenia; (9) wybicie betonu przez pręt zbrojeniowy.

Zestawienie wyników badań płyt żelbetowych w komorze wybuchowej przedstawiono w tabeli 1. Wprowadzono następujące oznaczenia dotyczące rodzaju elementów i sposobu przyłożenia obciążenia:

SI — pierwsza seria badań: podparcie na całym obwodzie płyty,

SII — druga seria badań: podparcie obwodowe o zwiększonej sztywności lub podparcie punktowe w narożach płyty na podkładkach stalowych 150 mm × 150 mm, o grubości 50 mm,

PZ — płyta żelbetowa bez wzmocnienia,

PWnA/S/W — płyta żelbetowa ze wzmocnieniem:  $n$  — liczba warstw wzmocnienia laminatami z włókien aramidowych — A, szklanych — S, węglowych — W, wzmocnienie taśmami —  $tw/ts$  (taśmy wąskie o szer. 10 cm/taśmy szerokie o szer. 20 cm); wzmocnienie płytami laminatu —  $p$ ; układ włókien: jednokierunkowe — 1k, dwukierunkowe — 2k,

BPS — bezpośrednie przyłożenie obciążenia bez przekładki stalowej.

Natomiast w celu oznaczenia efektów mechanizmu zniszczenia przyjęto opisy:

WPS( $x$ ) — wgłębienie pod przekładką stalową w  $x$  mm,

K( $x$ ) — krater w betonie o głębokości  $x$  mm,

WSS — wykruszenie betonu w obszarze zmiążdżenia strefy ściskanej,

WSR — wykruszenie betonu w obszarze strefy rozciąganej,

WBN — wykruszenie betonu w narożach,

PSS — pasmowe/liniowe wykruszenie betonu,

OSR — obszary spękania betonu w strefie rozciąganej,

SB — spęcznienie betonu w obszarze strefy ściskanej,

SB( $x$ ) — spęcznienie betonu pod laminatem na wysokość  $x$  mm,

CZP — zerwanie laminatu na całej powierzchni,

POL — powierzchniowe odspojenia laminatu,

LOL — pasmowe/liniowe odspojenia laminatu,

OT — odspojenie taśmy,

RL — rozerwanie laminatu,

Z( $x$ ) — zarysowanie o maksymalnej szerokości  $x$  w mm,

OS — bryła odłamu betonu w strefie ściskanej,

OR — bryła odłamu betonu w strefie rozciąganej,

OZ — odsłonięcie prętów zbrojenia,

WZ — wygięcie prętów zbrojenia,

WyB — wybicie betonu w całym przekroju poprzecznym,

Wyz — wybicie betonu przez pręt zbrojeniowy.

TABELA 1

Zestawienie wyników badań płyt

Nr eksp.	Oznac. eksp.	Rodzaj elementu	Masa ładunku dynamitu E4G4H [g]	Ugięcie trwałe w środku rozpiętości [mm]	Opis efektów (mechanizm zniszczenia)	
					Powierzchnia górna	Powierzchnia dolna
1	E27A SI	PZ	300	–	WPS(1), Z(0,5)	K(60), OR, Z(0,4)
2	E27 SI	PZ	400	–	WPS(9), Z(3)	WSR, OZ, Z(0,5)
3	E28 SI	PZ	400	–	WPS(12), WBN, Z(0,3)	K(80), WSR, WBN, OZ, Z(1)

cd. tabeli 1

4	E29 SI	PW-1A	450	-	WPS(4), Z(0,5)	POL, LOL, SB(11)
5	E30 SI	PW-2W	450	-	WPS(4), Z(0,3)	POL, SB(9)
6	E31 SI	PW-1S	450	-	WPS(8), Z(0,5)	POL, LOL, SB(10)
7	E32 SI	PW-tw-W	450	-	WPS(5), Z(1)	K(80), OR, OSR, OT, Z(0,3)
8	P1 SII	PZ	450	5-6	WPS(10), WyB, Z(2)	K(80), WyB, OZ, Z(2)
9	P2 SII	PZ odwrócona	450	13-15	WPS(5), WSS	K(90), OZ, OR, Z(3)
10	P13 SII	PZ	450	27-34	WPS(30), Z(0,2)	K(70), OR, Z(8)
11	P3 SII	PW-ts-W	450	-	WPS(5), Z(0,3)	K(60), OR, RL, Z(0,3)
12	P4 SII	PW-tw-W	600	-	WPS(5), K(10), Z(1)	K(80), OR, RL, Z(0,5)
13	P5 SII	PW-ts-W	2×300	-	brak widocznych uszkodzeń	brak widocznych uszkodzeń
14	P5A SII	PW-ts-W ponowne obciążenie	2×300 BPS	-	WyB, OS, Z(0,5)	WyB, K(80), RL, OT, Z(1)
15	P6 SII	PW-tw-W	600	-	WPS(20), WSS, Z(0,3)	K(50), OR, Z(1)
16	P7 SII	PW-tw-W	450	-	WPS(50), WSS, Z(0,4)	OSR, OR, WSR, OT, Z(0,3)
17	P8 SII	PW-tw-W	2×300 BPS	-	WyB, OS, Z(0,3)	WyB, OR, RL, Z(0,3)
18	P9 SII	PW-tw-W	450	17-21	WPS(20), WSS, Z(0,2)	K(30), OR, OT, Z(0,3)
19	P10 SII	PW2A	600	18-19	WPS(20), PSS, Z(0,2)	OR, POL, RL, Z(0,3)
20	P11 SII	PW2A	600	20	WPS(20), WSS, Z(3)	OR, POL, RL
21	P12 SII	PW2S	600	23-34	WPS(20), PSS, Z(1)	K(80), OR, CZP, Z(5)
22	P14 SII	PW2A	300 BPS	-	WyB, WSS, OS	RL, SB(10)
23	P15 SII	PW2S	600	36-38	WPS(20), Z(0,5)	K(80), OR, CZP, Z(5)
24	P16 SII	PW2S	200 BPS	0	K(80), WSS, OS	POL, OR, SB(10)

cd. tabeli 1

25	P17 SII	PW1S	600	30-41	WPS(10), WSS, PSS, Z(0,5)	POL, LOL, RL
26	P18 SII	PW1S	600	19-25	WPS(10), WSS, PSS, Z(0,5)	POL, LOL, SB(42), OR, RL
27	P19 SII	PW1W	600	55	WPS(20), PSS	K(70), OR, CZP, Z(4)
28	P20 SII	PW1W	450	19-21	WPS(10), WSS, PSS	OR, WyZ, Z(2)
29	P21 SII	PW1W	250 BPS	-	WyB, OS, Z(0,5)	WyB, SB(15), RL, Z(0,5)
30	P22 SII	PW1pA	600	15	WPS(10), PSS Z(2)	POL, WSR, OR, Z(2)
31	P23 SII	PW1pA	250 BPS	-	WSS, OS	K(50), WSR, OR, POL
32	P24 SII	PW1pW	600	38-40	WPS(6), PSS	K(40), WSR, OR, CZP, Z(4)
33	P25 SII	PW1pW	250 BPS	-	WSS, SB	POL, OR, SB(15)
34	P26 SII	PW1pA	600 płaski φ20 cm	58-60	WPS(20), PSS	POL, RL, OR, Z(2)
35	P27 SII	PW2W	600 płaski φ20 cm	59-60	WPS(10), PSS	POL, OR, OZ, WZ, Z(3)
36	P28 SII	PW2W	300 BPS	-	WyB, SB	POL, WSR, RL, SB(15)
37	P29 SII	PW1A	250 BPS	-	WyB, SB	POL, WSR, RL
38	P30 SII	PW1A	450	12-14	WPS(10), Z(0,2)	POL, WSR, RL, OR, Z(2)
39	P31 SII	PW1W odwrócona	300 BPS	8	WyB	WyB, OR, Z(0,5)


### 3. Wyniki badania płyt żelbetowych

Poniżej przedstawiono wyniki I serii badań płyt żelbetowych zwykłych (bez wzmocnienia) oraz płyt wzmocnionych laminatami. Ta seria badań płyt została zrealizowana w komorze wybuchowej na stanowisku badawczym opisanym w części I niniejszej pracy [1].

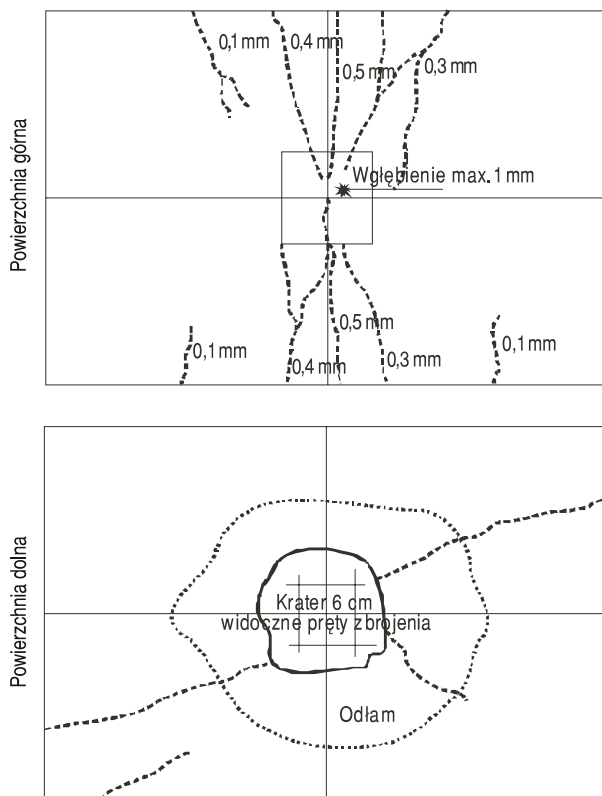
Wyniki dotyczą schematów mechanizmów zniszczenia. Powtarzalne opisy schematów zniszczenia przedstawia poniższa legenda. Pozostałe opisy, nawiązujące do efektów zniszczenia zamieszczonych w tabeli 1, zamieszczono bezpośrednio na każdym schemacie.

Legenda:Liniowe odspojenia powłoki Rysa 

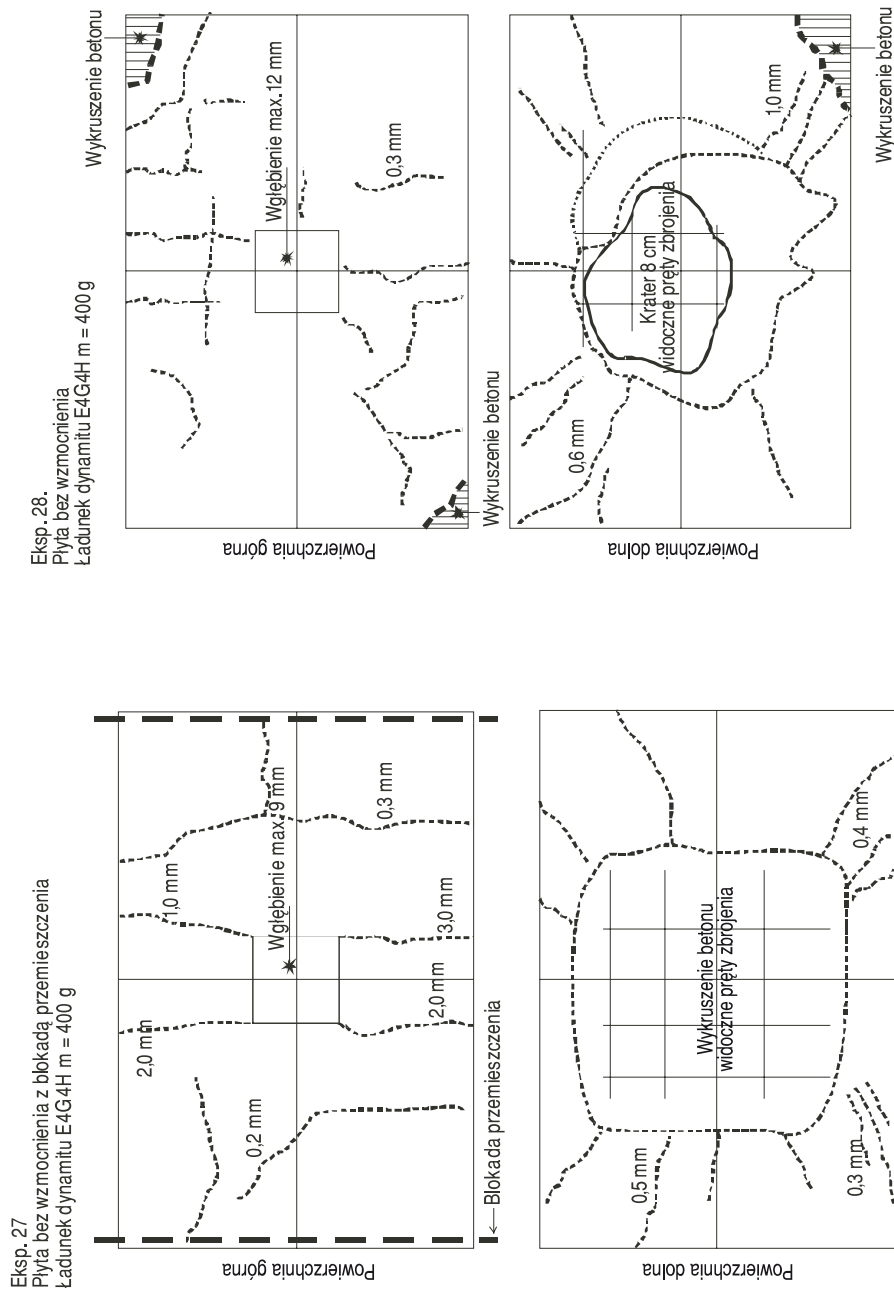
Szerokość rysy 0,3 mm

Ugięcie trwałe środka krawędzi w mm Wygięcie trwałe odwrotne w mm 

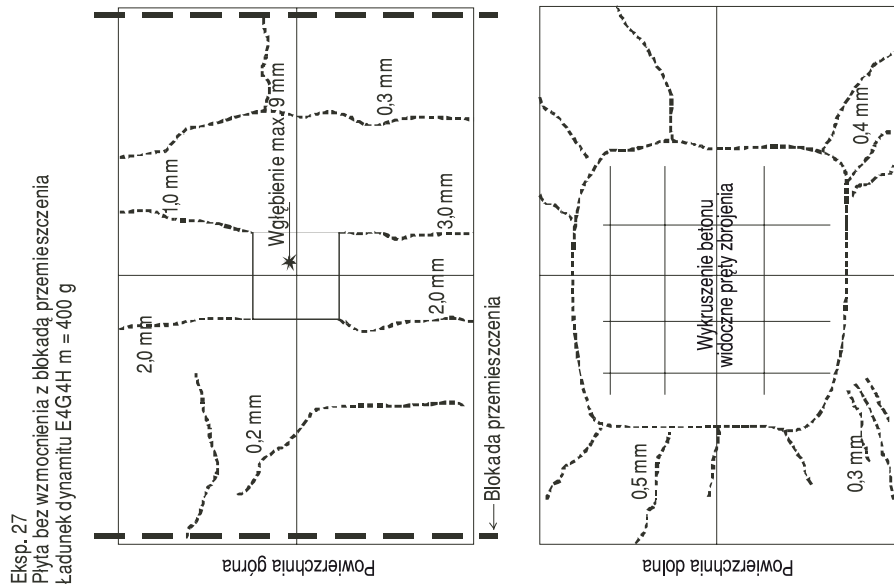
Eksp. 27A  
 Płyta bez wzmocnienia  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 300 g



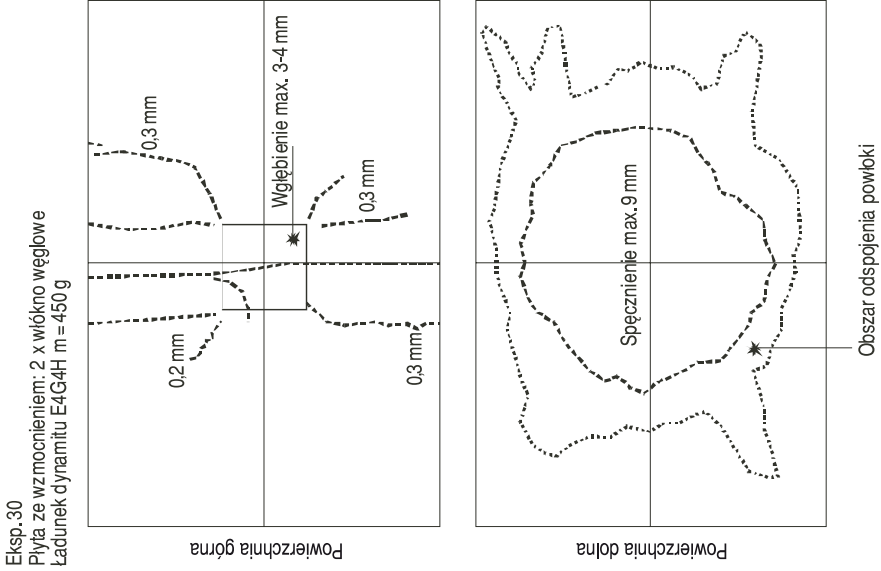
Rys. 1. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej E27A



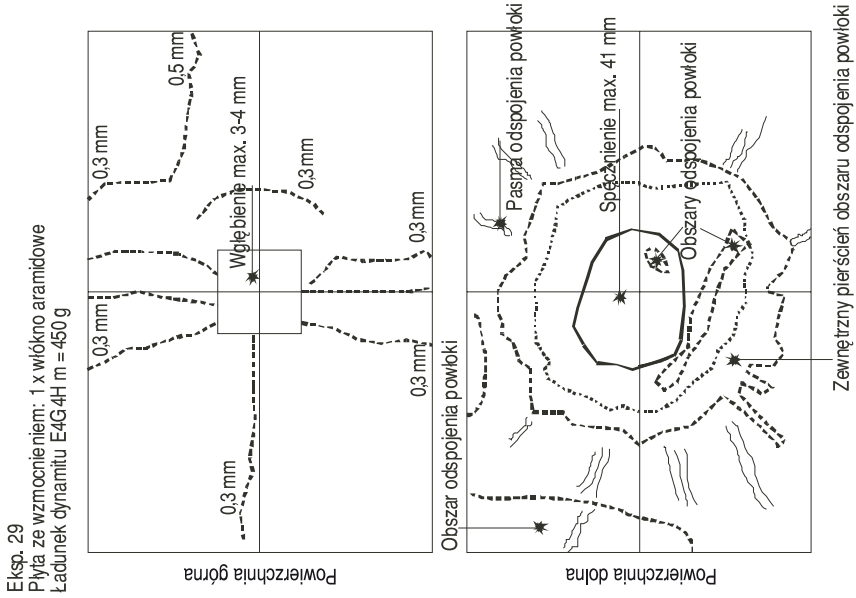
Rys. 3. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej E28



Rys. 2. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej E27



Rys. 5. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej E30

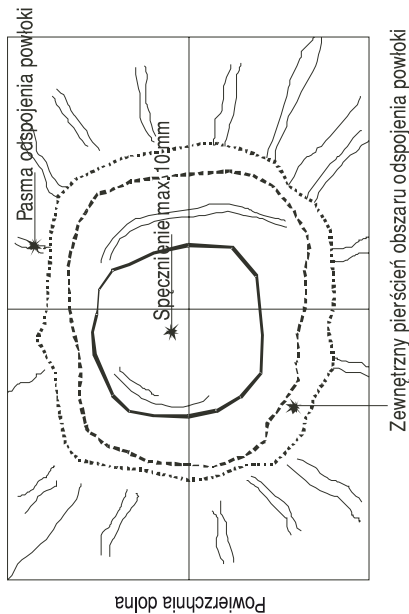
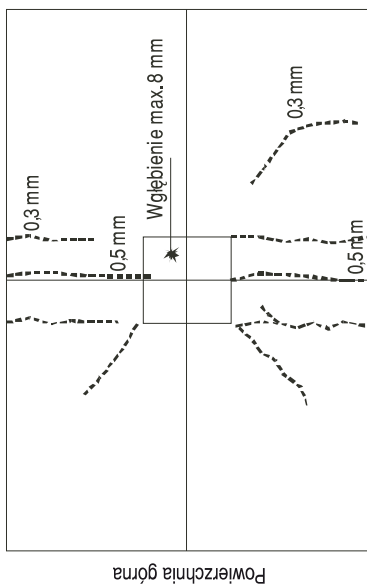


Rys. 4. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej E29



Eksp. 31

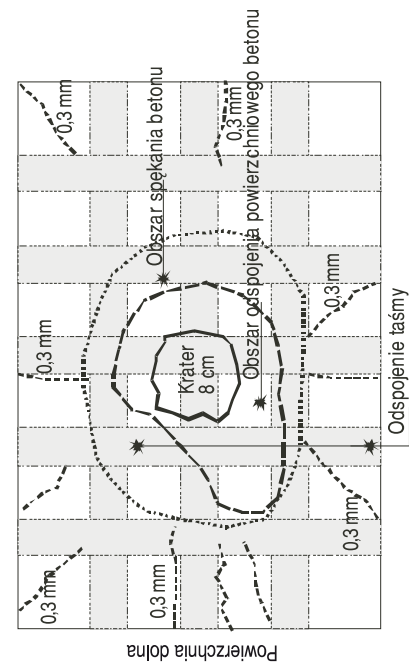
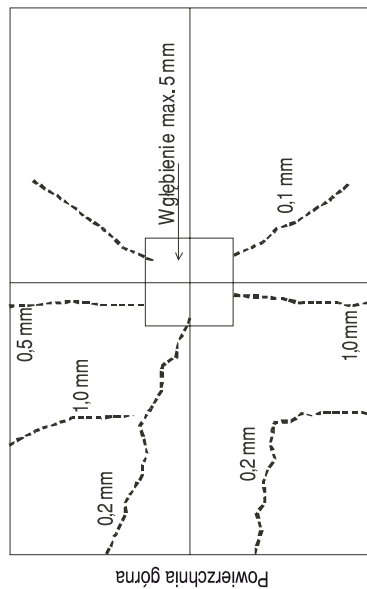
Płyta ze wzmocnieniem: 1 x włókno szklane  
Ładunek dynamiczny E4G4H m = 450 g



Rys. 6. Mechanizm niszczenia płyty żelbetowej E31

Eksp. 32

Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 10 cm z włókna węglowego  
Ładunek dynamiczny E4G4H m = 450 g



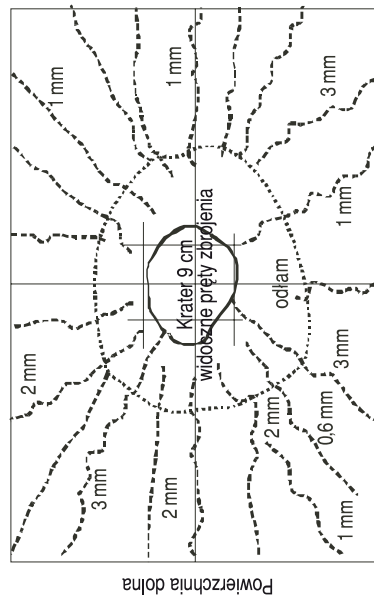
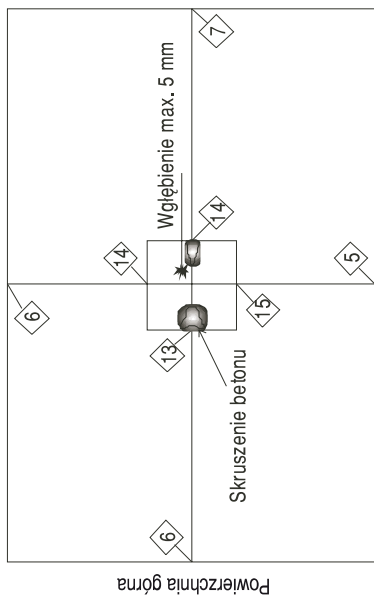
Rys. 7. Mechanizm niszczenia płyty żelbetowej E32

W eksperymentach 29-32 płyty żelbetowe podparte obwodowo i wzmocnione włóknem i taśmami kompozytowymi poddano działaniu obciążenia wybuchowego. Obciążane płyty żelbetowe oparto przegubowo na konstrukcji stalowej, jedynie w przypadku eksperymentu 27 dwie krótsze krawędzie płyty zamocowano do konstrukcji podparcia.

W powyższych eksperymentach w wyniku działania obciążenia wybuchowego przyłożonego poprzez przekładkę stalową płyty żelbetowe uległy uszkodzeniu. Na powierzchni dolnej i górnej powstały rysy o szerokości w przedziale od 0,1 mm do 3,0 mm. Przebieg rys przedstawiono na schematach. W miejscu przyłożenia przekładki stalowej powstało zagłębienie na powierzchni płyty. Na powierzchni dolnej w obszarze przyłożenia obciążenia warstwa betonu uległa odspojeniu, odsłaniając dolną warstwę zbrojenia. Bezpośrednio pod przekładką stalową na powierzchni dolnej widoczne było przegłębienie w postaci odłamu. W eksperymencie 28 beton w narożnikach płyty został wykruszony. W przypadku płyt ze wzmocnieniem matami kompozytowymi w obszarze przyłożenia obciążenia nastąpiło odspojenie kompozytu od powierzchni płyty, z widocznym spęgnięciem betonu. Beton w środkowej części płyt uległ zmiążdżeniu (skruszzeniu) i po odspojeniu laminatu wzmocnienia dawał się łatwo usuwać. W przypadku płyty ze wzmocnieniem w postaci taśm kompozytowych od strony dolnej widoczny był obszar rozwarstwienia powierzchniowego betonu z widocznym kraterem w części środkowej. Przyczepność taśmy kompozytowej do betonu również została zniszczona w bezpośrednim sąsiedztwie odłamu betonowego.

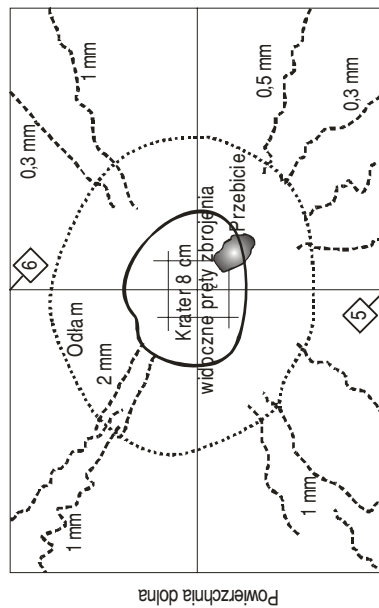
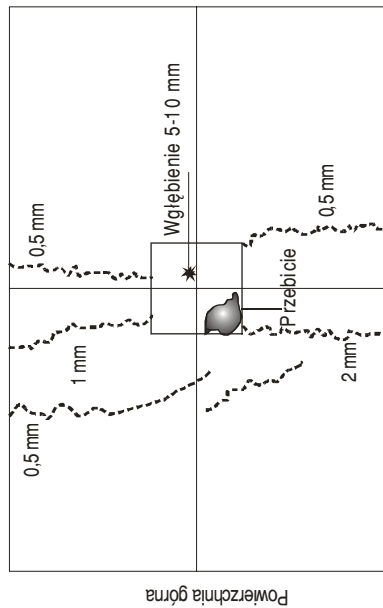
Poniżej przedstawiono wyniki II serii badań doświadczalnych po zmianach dotyczących sposobu podparcia płyt. Wprowadzono dwie zmiany sposobu podparcia. Mianowicie, pierwsza z nich polegała na zwiększeniu sztywności obwodowych podpór płyt przez wzmocnienie kształtowników podpór za pomocą zastrzałów. Druga zmiana polegała na zmianie sposobu podparcia płyt z obwodowego podparcia przegubowego na „punktowe” podparcie w narożach płyt na przekładkach stalowych o wymiarach  $150 \times 150$  mm i grubości 50 mm.

Płyta 2  
Płyta bez wzmocnienia – odwrócona  
Ładunek dynamitu E4G4H m = 450 g



Rys. 9. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P2

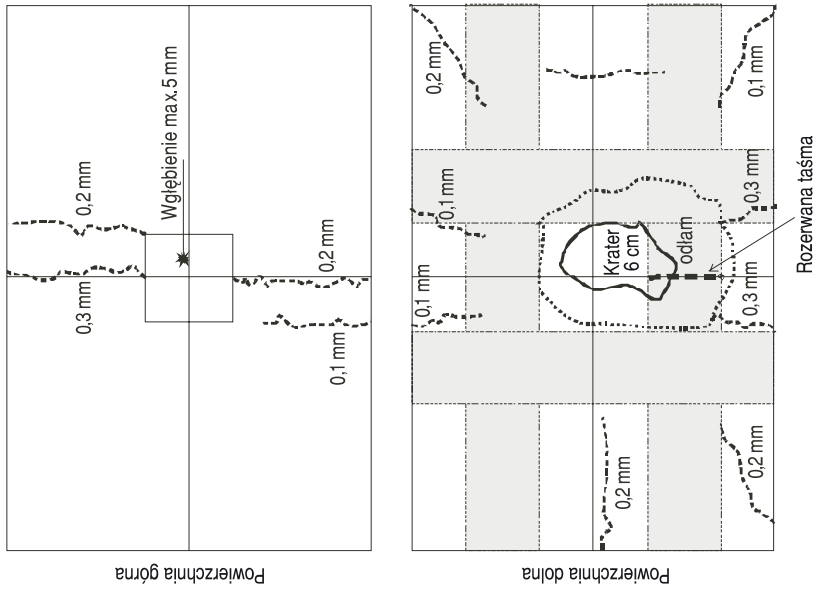
Płyta 1  
Płyta bez wzmocnienia  
Ładunek dynamitu E4G4H m = 450 g



Rys. 8. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P1

Płyta 3

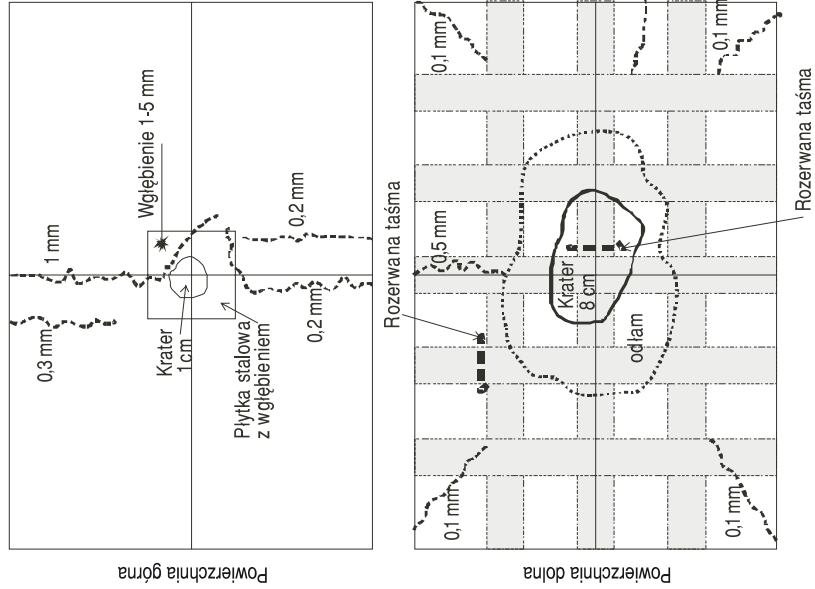
Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 20 cm z włókna węglowego Ładunek dynamitu E4G4H m = 450 g



Rys. 10. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P3

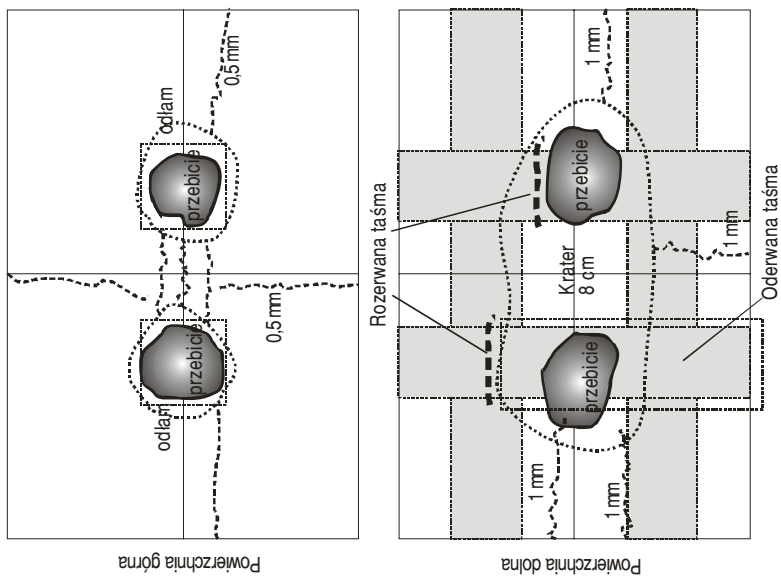
Płyta 4

Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 10 cm z włókna węglowego Ładunek dynamitu E4G4H m = 600 g



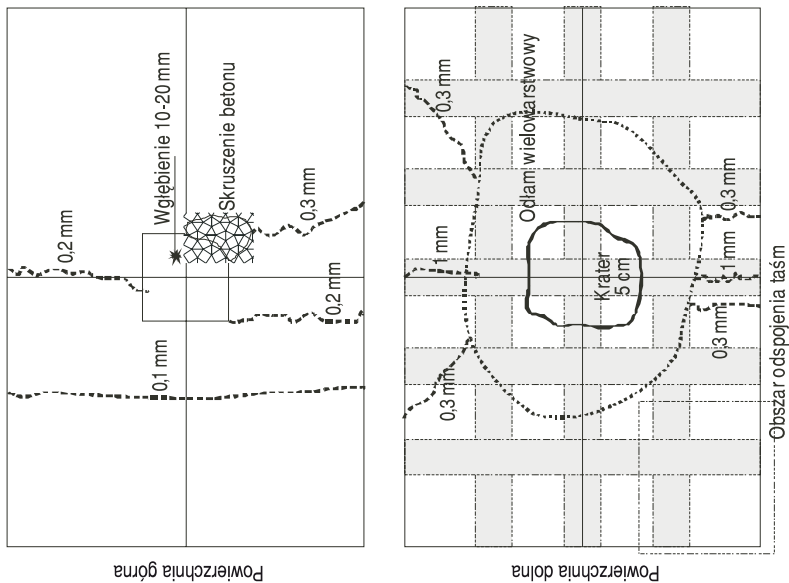
Rys. 11. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P4

Płyta 5 - dwie przekładki stalowe: BEZ WIDOCZNYCH USZKODZEŃ  
 Płyta 5A - ponowne obciążenie bez przekładek stalowych  
 Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 20 cm z włókna węglowego  
 Dwa ładunki dynamitu E4G4H po m = 300 g



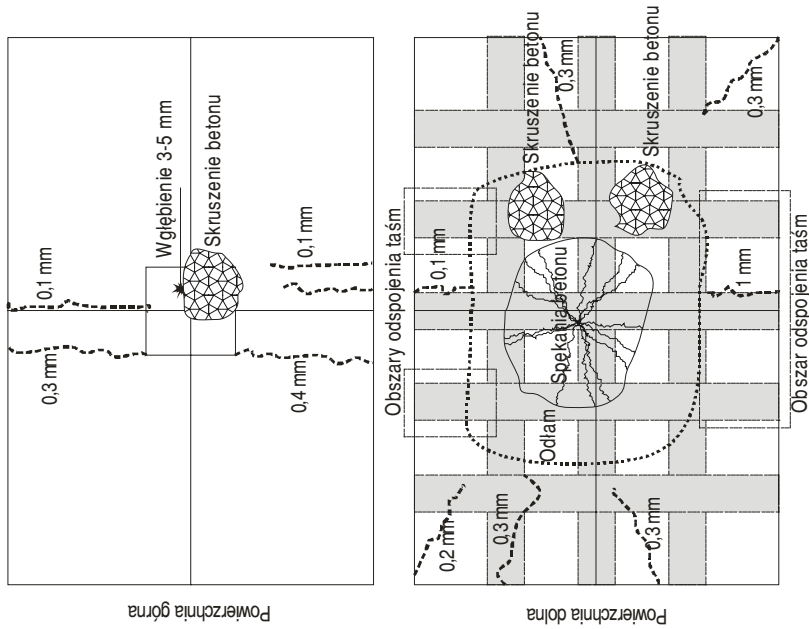
Rys. 12. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P5, P5A

Płyta 6  
 Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 10 cm z włókna węglowego  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 600 g



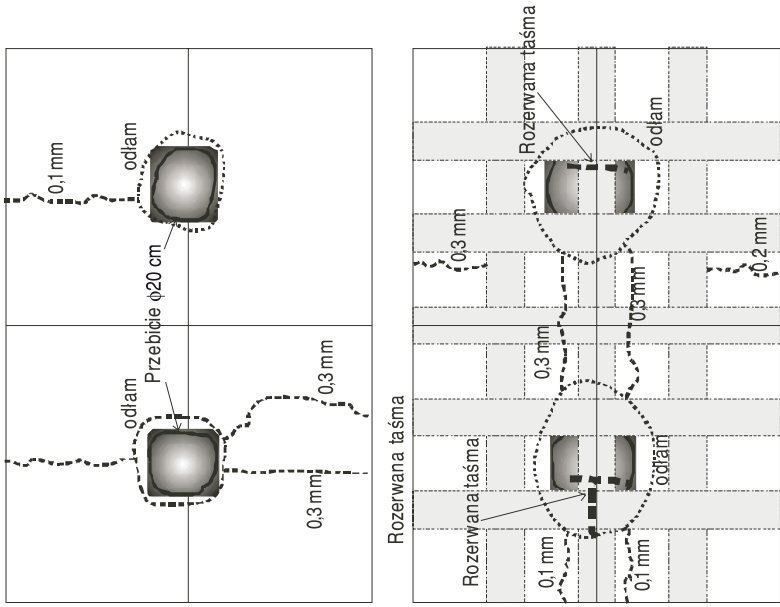
Rys. 13. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P6

Płyta 7  
Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 10 cm z włókna węglowego  
Ładunek dynamitu E4G4H m = 450 g



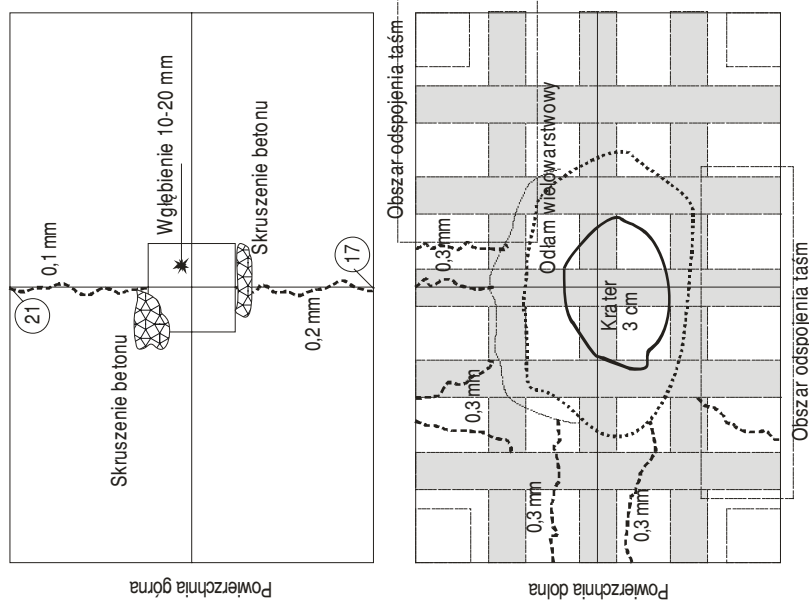
Rys. 14. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P7

Płyta 8  
Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 10 cm z włókna węglowego  
Dwa ładunki dynamitu E4G4H po m = 300 g bez przekładek stalowych



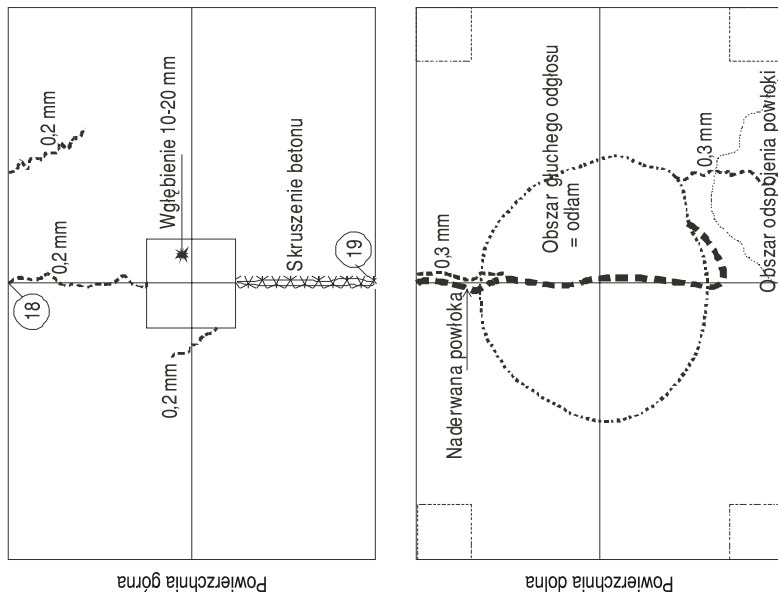
Rys. 15. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P8

Płyta 9 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: krzyżujące się taśmy o szer. 10 cm z włókna węglowego  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m= 450 g



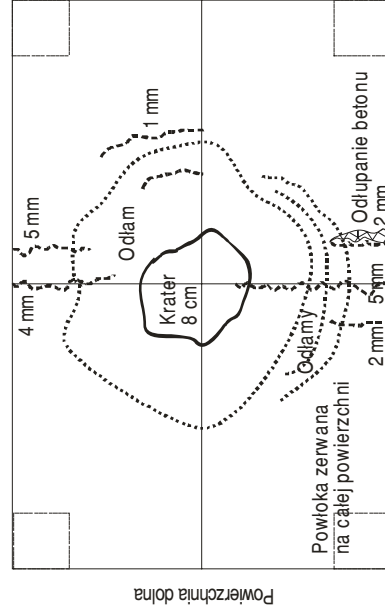
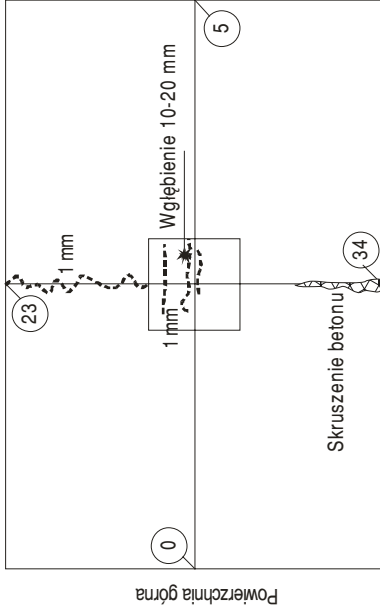
Rys. 16. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P9

Płyta 10 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2x włókno aramidowe  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m= 600 g



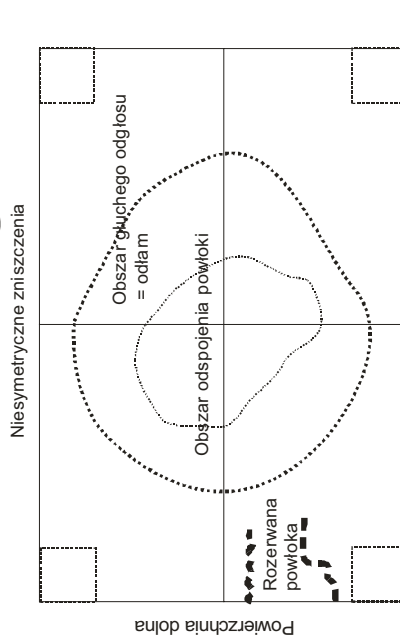
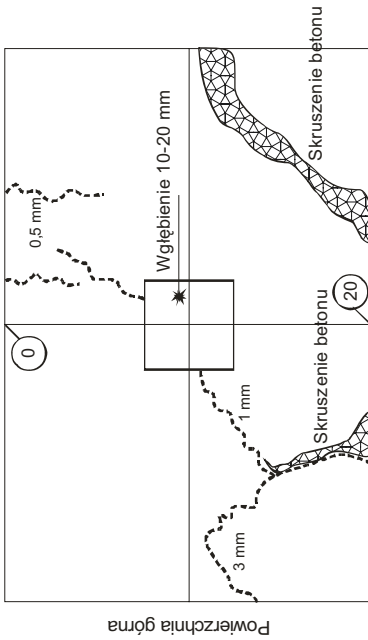
Rys. 17. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P10

Płyta 12 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2 x włókno szklane  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 600 g



Rys. 19. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P.12

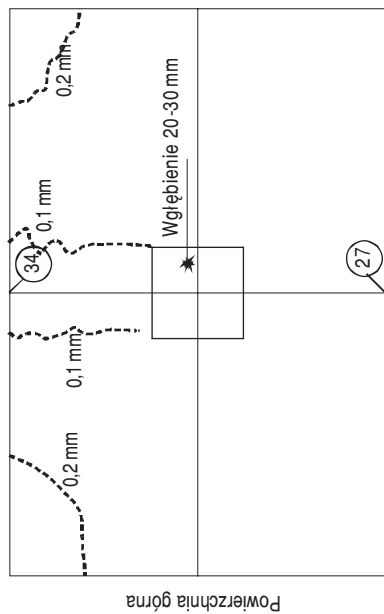
Płyta 11 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2 x włókno aramidowe  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 600 g



Rys. 18. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P.11

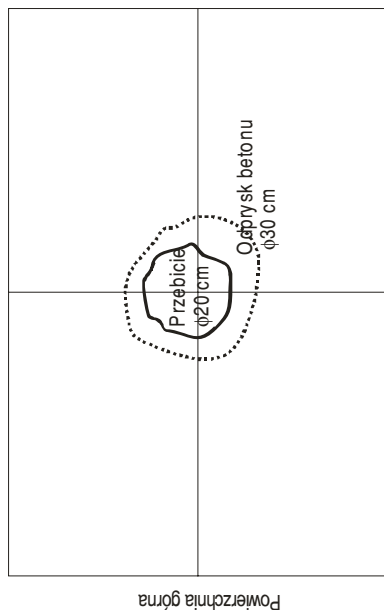


Płyta 13 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta bez wzmocnienia  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 450 g

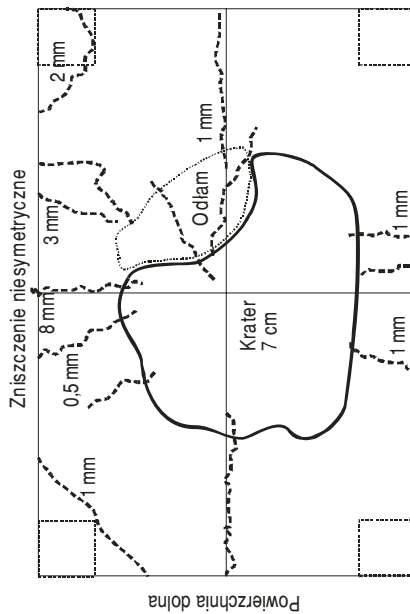


Powierzchnia góra

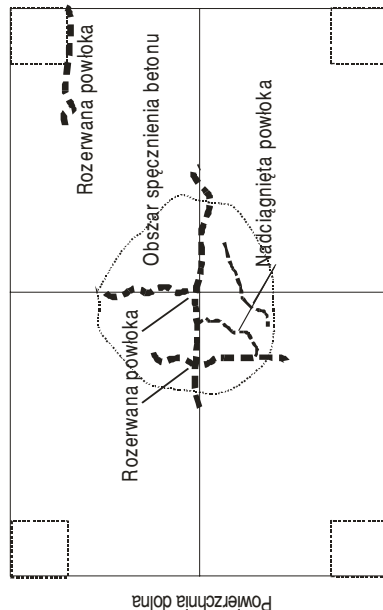
Płyta 14 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2 x włókno aramidowe  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 300 g bez przekładki stalowej



Powierzchnia góra



Powierzchnia dolna

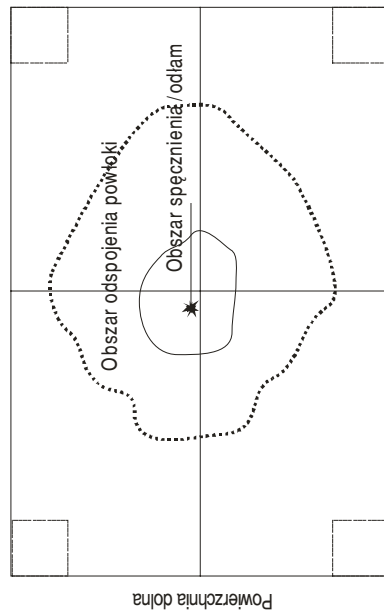
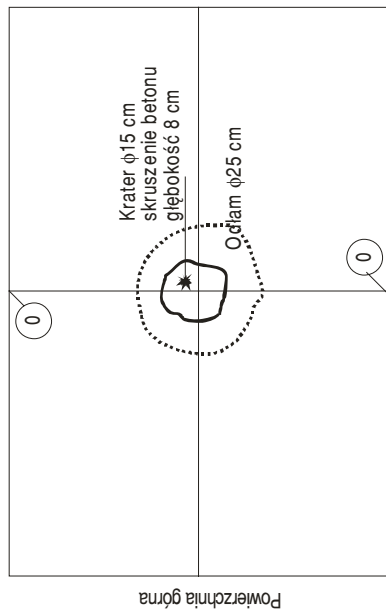


Powierzchnia dolna

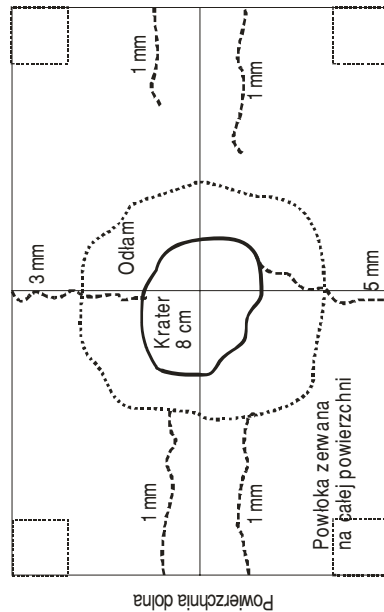
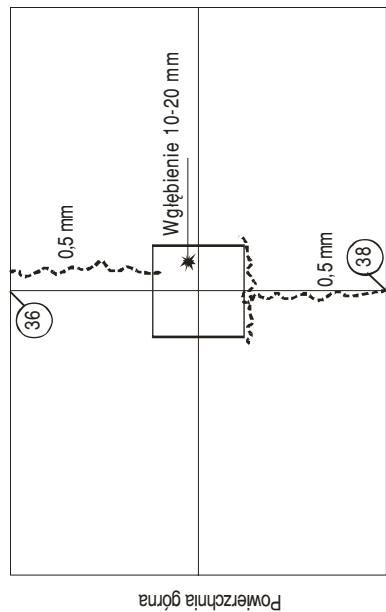
Rys. 20. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P13

Rys. 21. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P14

Płyta 16 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2 x włókno szklane  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 200 g bez przekładki stalowej



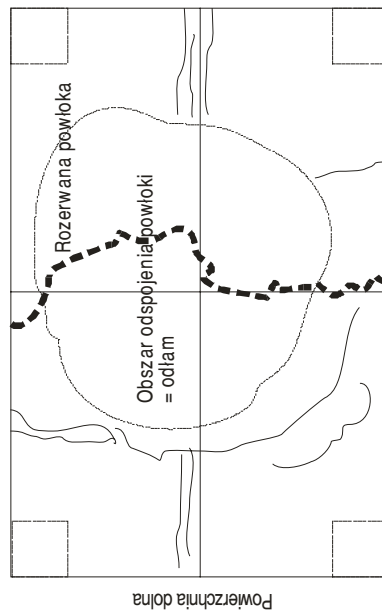
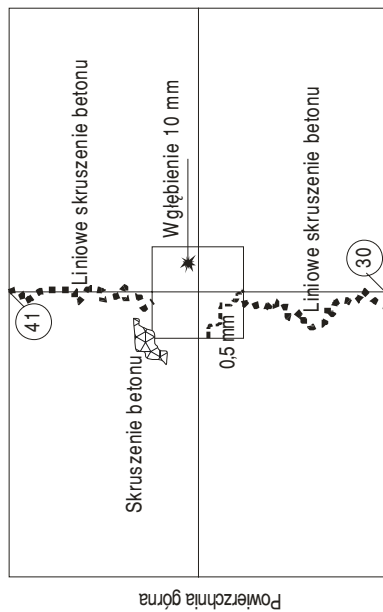
Płyta 15 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2 x włókno szklane  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 600 g



Rys. 23. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P16

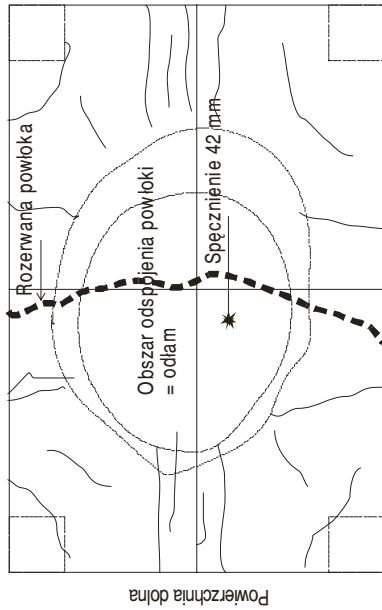
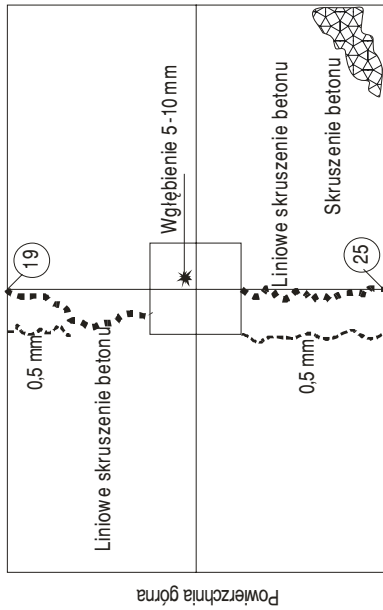
Rys. 22. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P15

Płyta 17 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x włókno szklane  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 600 g



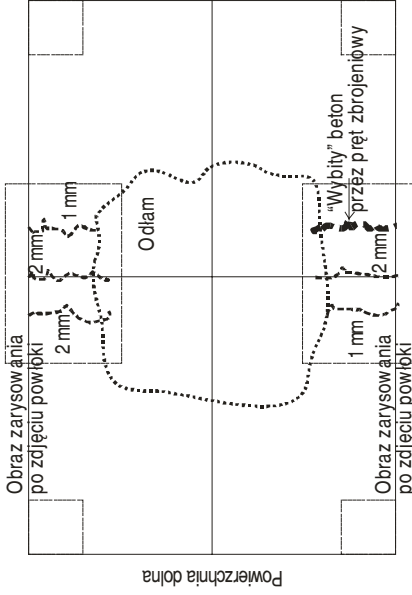
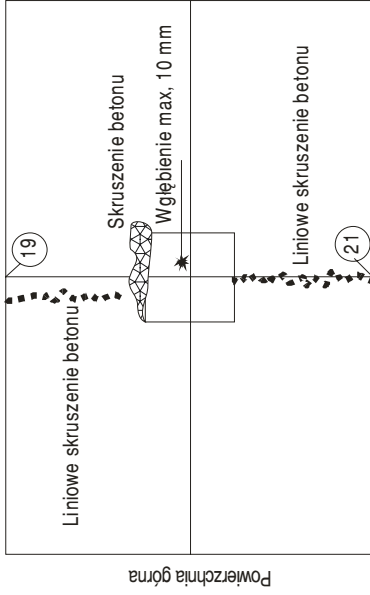
Rys. 24. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P17

Płyta 18 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x włókno szklane  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 600 g



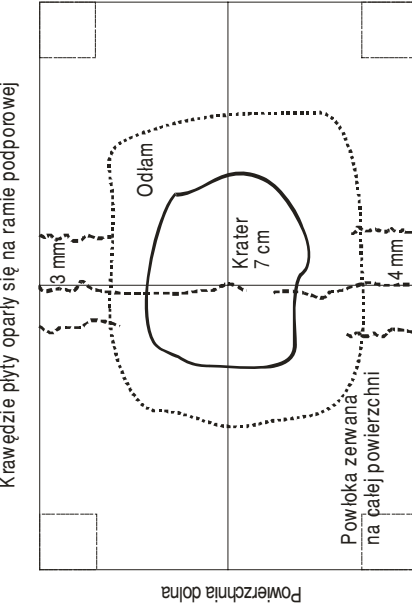
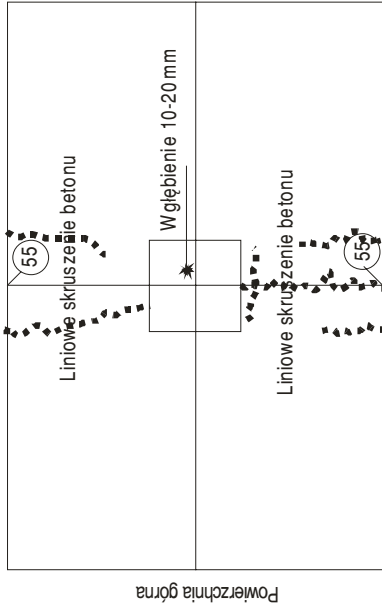
Rys. 25. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P18

Płyta 20 podparcie w narożach na płytkach stałowych 150x150x50 mm  
Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x włókno węglowe  
Ładunek dynamiczny E4G4H m = 450 g



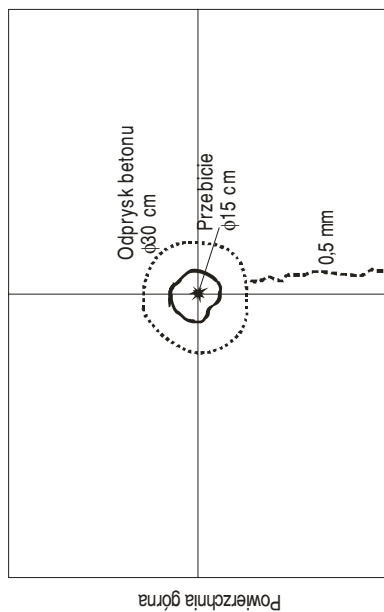
Rys. 27. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P20

Płyta 19 podparcie w narożach na płytkach stałowych 150x150x50 mm  
Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x włókno węglowe  
Ładunek dynamiczny E4G4H m = 600 g



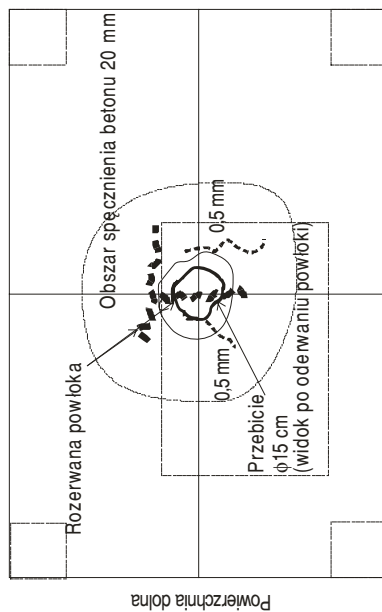
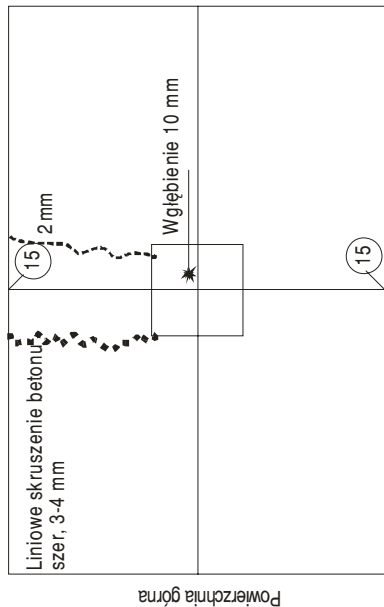
Rys. 26. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P19

Płyta 21 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x włókno węglowe  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m=250 g bez przekładki stalowej

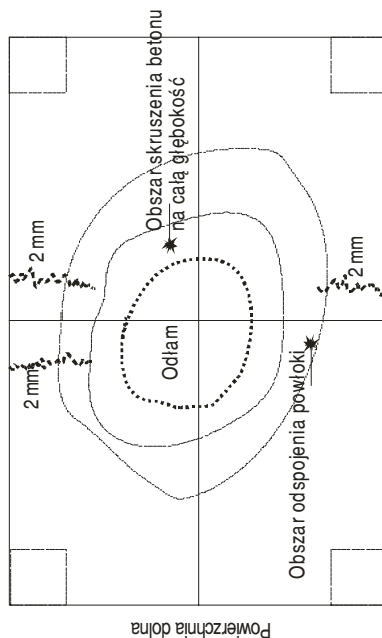


Rys. 28. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P21

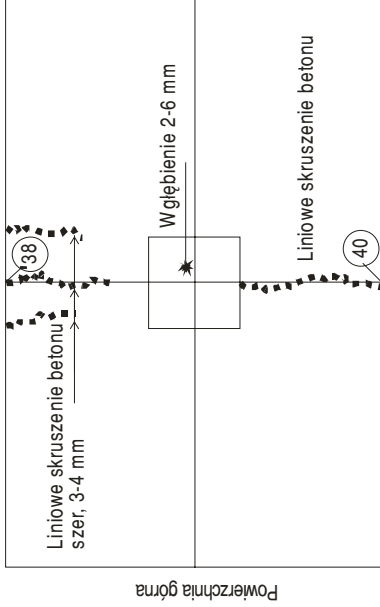
Płyta 22 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x płyta z laminatu aramidowego  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 600 g



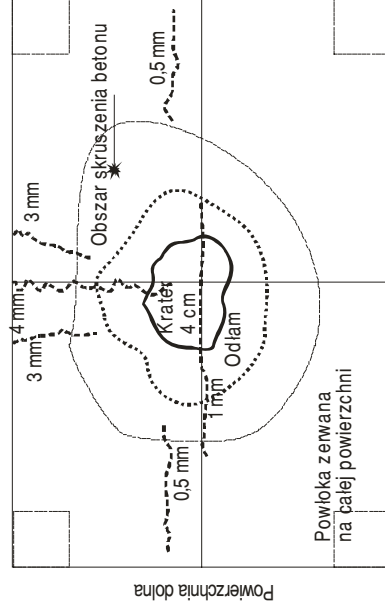
Rys. 29. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P22



Płyta 24 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x płyta z laminatu węglowego  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 600 g

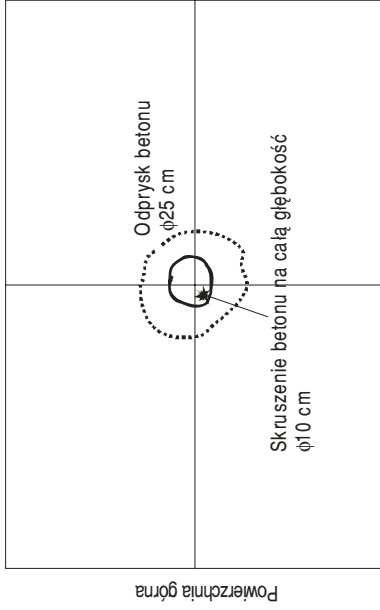


Powierzchnia górna

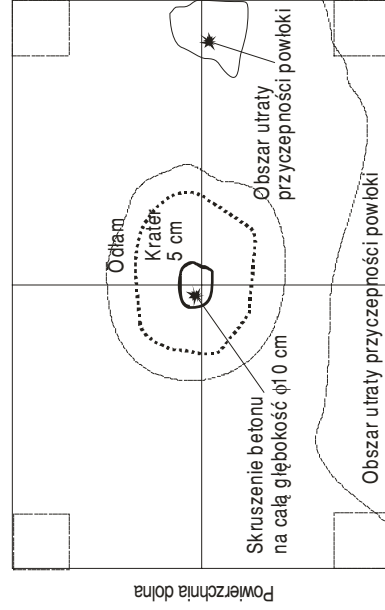


Powierzchnia dolna

Płyta 23 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x płyta z laminatu aramidowego  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 250 g bez przeładki stalowej



Powierzchnia górna

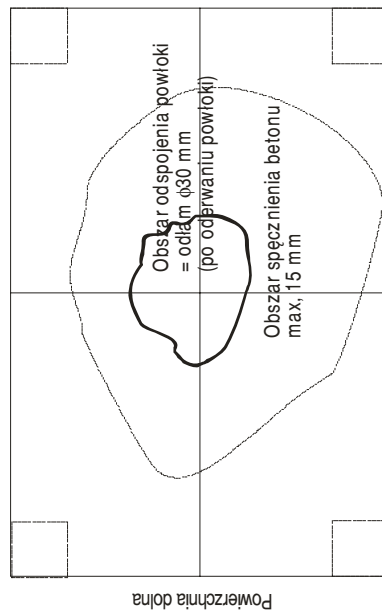
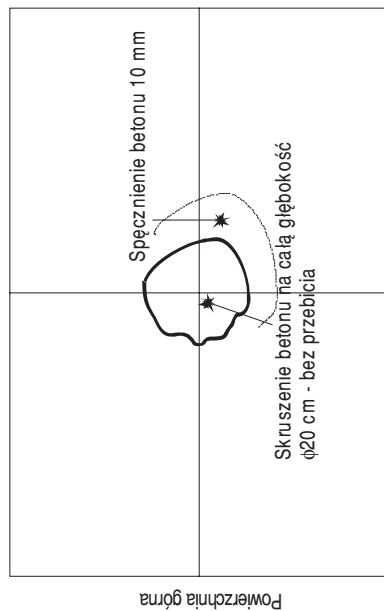


Powierzchnia dolna

Rys. 31. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P24

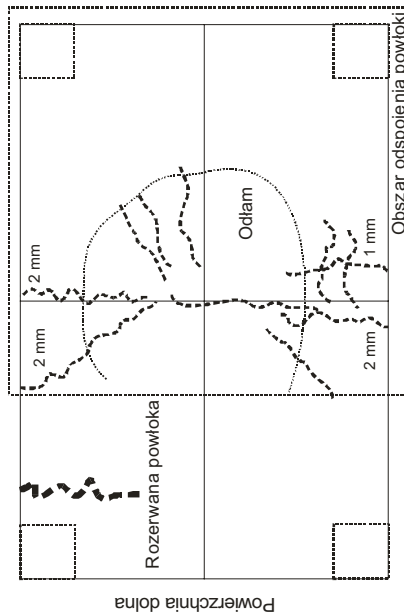
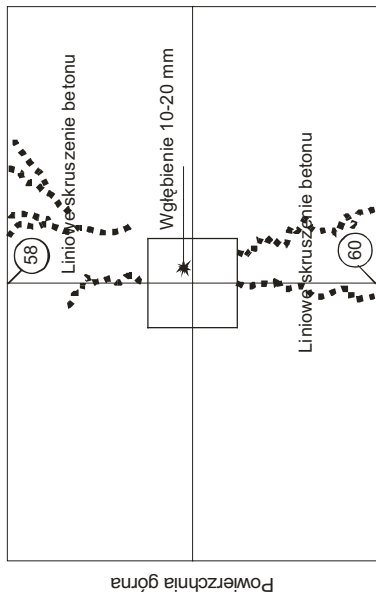
Rys. 30. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P23

Płyta 25 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x płyta z laminatu węglowego  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 250g bez przekładki stalowej



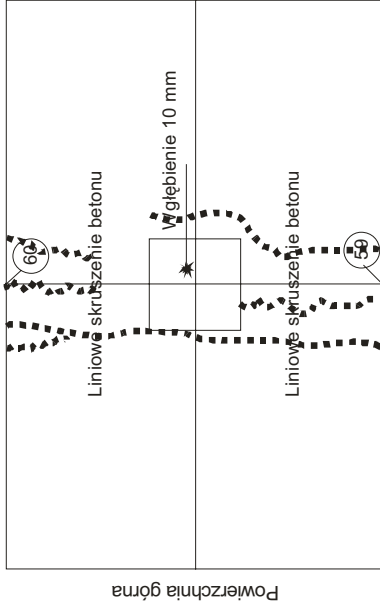
Rys. 32. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P25

Płyta 26 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x płyta z laminatu aramidowego  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 600g (ładunek płaski  $\phi$ 20 cm)

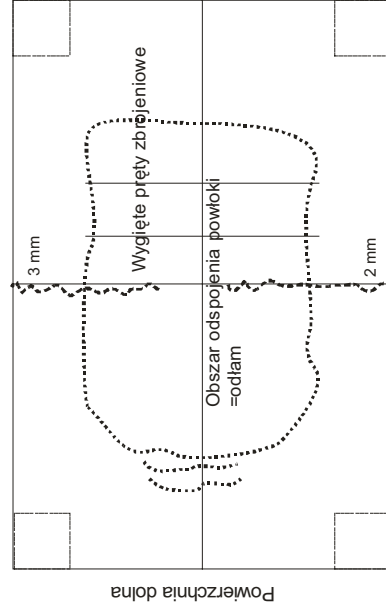
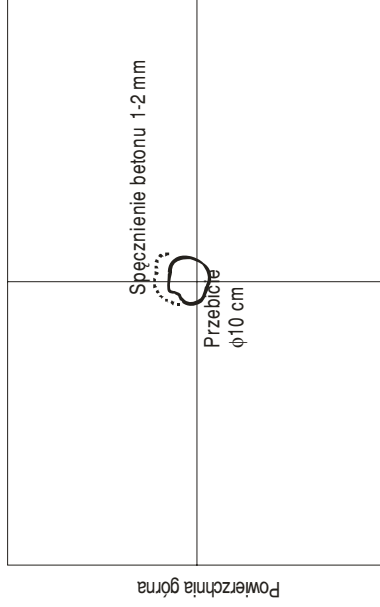


Rys. 33. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P26

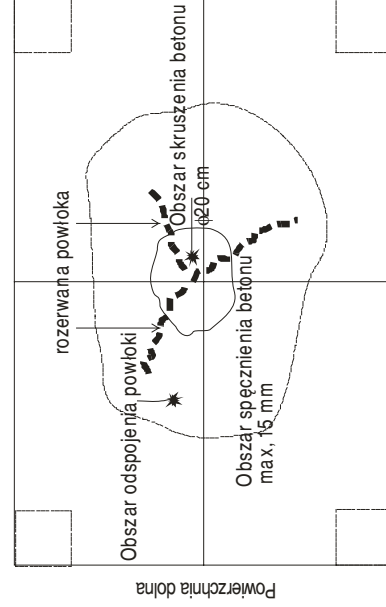
Płyta 27 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2 x włókno węglowe  
Ładunek dynamiczny E4G4H m = 600g (ładunek piaski  $\phi$ 2,0 cm)



Płyta 28 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 2 x włókno węglowe  
Ładunek dynamiczny E4G4H m = 300g bez przekładki stalowej



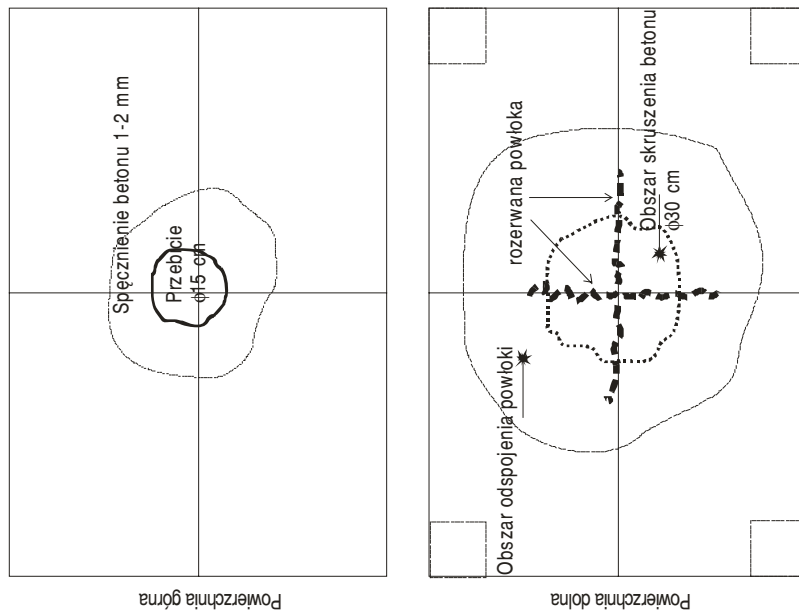
Rys. 34. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P27



Rys. 35. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P28

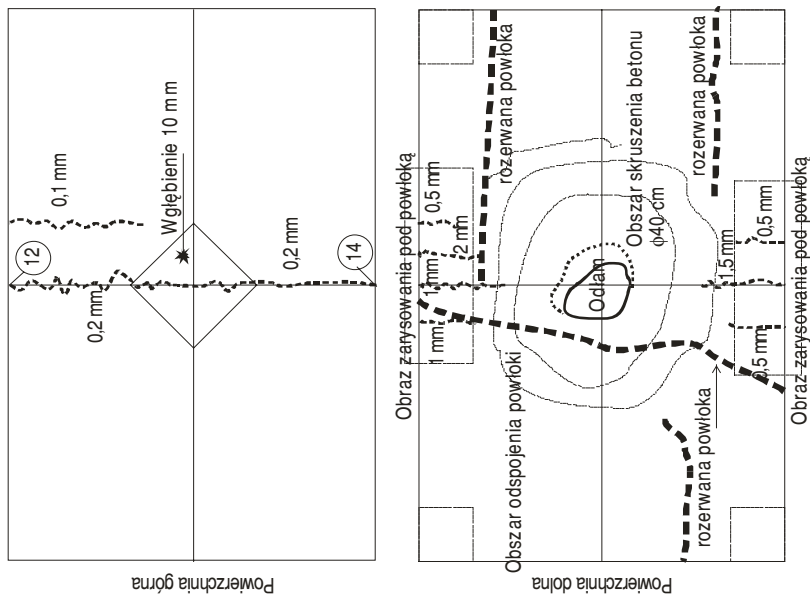


Płyta 29 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x włókno aramidowe  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 250 g bez przekładki stalowej



Rys. 36. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P29

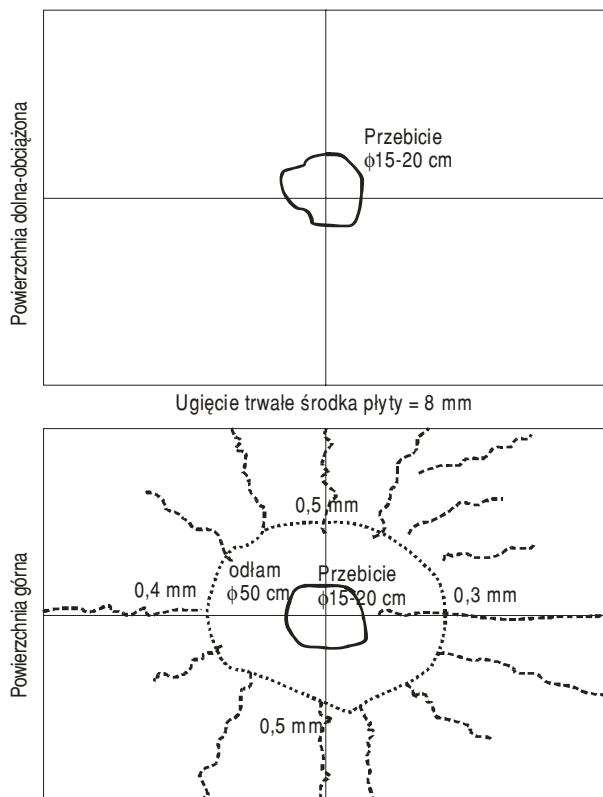
Płyta 30 podparcie w narożach na płytkach stalowych 150x150x50 mm  
 Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x włókno aramidowe  
 Ładunek dynamiczny E4G4H m = 450 g



Rys. 37. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P30

## Płyta 31

Płyta ze wzmocnieniem: powłoka 1 x płyta z laminatu węglowego - odwrócona  
 Ładunek dynamitu E4G4H m = 300 g bez przekładki stalowej



Rys. 38. Mechanizm zniszczenia płyty żelbetowej P31

Po zmianie sposobu podparcia płyt i wzmocnieniu konstrukcji wsporczej mechanizm zniszczenia płyt przedstawiał się w sposób następujący. Na powierzchni dolnej i górnej płyt powstały rysy o szerokości w przedziale od 0,1 mm do 5,0 mm. W nielicznych przypadkach dochodziło do liniowego skruszenia betonu na powierzchni górnej płyty w pobliżu punktowych podparć. W miejscu przyłożenia przekładki stalowej powstawało zagłębienie o głębokości od 1 mm do 20 mm. W eksperymentach, w których ładunek dynamitu układano bezpośrednio na płycie, detonacja powodowała wybite otworu o średnicy około 20 cm. Na powierzchni dolnej w obszarze przyłożenia obciążenia warstwa betonu uległa odspojeniu, odsłaniając dolną warstwę zbrojenia. Bezpośrednio pod przekładką stalową na powierzchni dolnej powstawał odłam postaci krateru. Zjawisko to było bardzo dobrze widoczne w płytach bez wzmocnienia lub ze wzmocnieniem w postaci taśm kompozytowych. W przypadku płyt wzmocnionych powierzchniowymi matami

zmiażdżony beton w środkowej części płyty był utrzymywany przez matę kompozytową, o ile nie została ona uszkodzona. Objawem takiego stanu zniszczenia jest widoczne odspojenie laminatu od powierzchni betonu, wypuklenie (spęcznienie) powierzchni dolnej płyty i głuchy dźwięk przy uderzaniu świadczący o skruszeniu betonu. Przy znacznych wartościach obciążenia dochodziło do przerwania ciągłości wzmocnienia zarówno w przypadku mat jak i taśm kompozytowych. Rozerwanie charakteryzowało się prostoliniowym przebiegiem i postrzępioną krawędzią laminatu.

#### 4. Podsumowanie

W niniejszej części pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych płyt żelbetowych poddanych działaniu obciążenia wybuchowego. Badania przeprowadzono dla dwu rodzajów elementów żelbetowych, zwykłych bez dodatkowego wzmocnienia oraz dla elementów wzmocnionych wysokowytrzymałościami powłokowymi laminatami z włókien aramidowych, szklanych i węglowych. Zasadniczą częścią pracy jest prezentacja wyników badań, na które składają się schematy mechanizmów zniszczenia oraz trwałe przemieszczenia płyt.

#### 5. Zakończenie i wnioski

W wyniku badań stwierdzono, że żelbetowe elementy konstrukcyjne wzmocnione wysokowytrzymałościami laminatami wykazują pod obciążeniem wybuchowym zwiększenie nośności, zmniejszenie przemieszczeń, ograniczenie obszarów destrukcji betonu, zwiększoną zdolność do pochłaniania energii.

Poszczególne parametry wyężenia i deformacji zależą od rodzaju materiału wzmocniającego i konfiguracji wzmocnienia.

Stwierdzono, że wprowadzenie wzmocnień powłokowych generuje w elementach żelbetowych nowe efekty typu miejscowego, a mianowicie spęcznienie betonu pod laminatem, pasmowe i powierzchniowe odspojenia laminatu, w tym na całej powierzchni, rozerwanie laminatu oraz przede wszystkim zmniejszenie zasięgu uszkodzenia elementu i wyeliminowanie rozrzutu uszkodzonych fragmentów betonu.

Wyniki pracy mogą stanowić podstawę do analiz porównawczych uzyskiwanych metodami numerycznymi.

## LITERATURA

- [1] P. PONETA, A. GILUŃ, J. JURCZUK, P. ŚWIEŻEWSKI, A. STOLARSKI, G. BĄK, T. BŁAŻEJEWICZ, R. KRZEWIŃSKI, S. ONOPIUK, R. REKUCKI, Z. SZCZEŚNIAK, *Badania elementów żelbetowych wzmocnionych laminatami obciążonych wybuchowo*, cz. I. *Opis programu badań i badania materiałów konstrukcyjnych*, Biul. WAT, 60, 4, 2011, 41-77.

P. PONETA, A. GILUŃ, J. JURCZUK, P. ŚWIEŻEWSKI, A. STOLARSKI,  
G. BĄK, T. BŁAŻEJEWICZ, R. KRZEWIŃSKI, S. ONOPIUK, R. REKUCKI,  
Z. SZCZEŚNIAK

**Investigations of reinforced concrete members strengthened by laminates  
under explosive loading. Part III. Experimental results for reinforced concrete  
beams and columns**

**Abstract.** The results of experimental investigations of reinforced concrete plates were introduced in the present part of the paper. Investigations were carried out for two kinds of reinforced concrete elements, i.e., plain elements without additional strengthening and for elements strengthened by high-strength coating laminates made from aramide, glass, and carbon fibres. The schemes of failure mechanisms and the permanent displacements of plates were presented as the principal results of the investigations.

It was stated in the result of investigations, that reinforced concrete structural elements strengthened by high-strength laminates show, under the explosive loading enlargement the carrying capacity, decrease in displacements, the limitation of the destruction areas of the concrete, enlarged ability to absorption of the energy. The respective parameters of effort and deformation depend on the kind of material strengthening and the configuration of the strengthening. It was confirmed that the application of coating strengthening generates the new effects of local type in reinforced concrete elements, namely swelling the concrete under laminate, the thread and superficial separation of the laminate, in this on the whole surface, the tearing the laminate and, first of all, decrease in the range of the failure of the element and elimination of the spread of the damaged fragments of the concrete.

**Keywords:** experimental investigations, explosive loading, reinforced concrete members, plates