INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI
ODDZIAŁ TECHNOLOGII
I MATERIAŁOZNAWSTWA
ELEKTROTECHNICZNEGO

Wojciech Błażejewski

Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego.

Praca doktorska

Promotor
Dr hab. inż. Radosław Iwankiewicz prof. nadzw. P.Wr.

Wrocław 1999

Spis treści

1 Wstęp **8**
1.1 Sformułowanie problemu 15
1.2 Cel pracy 16

2 Opis geometryczny nawijania włókna **17**
2.1 Wprowadzenie i przegląd literatury 17
2.2 Główne zasady metody tablicowej 19
2.2.1 Charakterystyka parametrów nawijania 19
2.2.2 Opis metody tablicowej 22
2.2.3 Dyskusja wyników 24
2.3 Przykłady zastosowań metody tablicowej 28
2.3.1 Nawijanie butli 28
2.3.2 Wyznaczanie długości nawijanego elementu kompozytowego 30
2.3.3 Nawoje dwuwarstwowe 31
2.3.4 Ustawianie nawijarek łańcuchowych 32
2.3.5 Określanie długości pasma 34
2.3.6 Program komputerowy do wyznaczania nawojów 34
2.4 Podsumowanie 36

3 Emisja akustyczna (EA) w badaniach kompozytów **37**
3.1 Kierunki zastosowań EA 38
3.2 Metodyka badań EA 40
3.3 Układ badawczy EA 42
3.4 Przygotowawcze badania EA rur skęcanych 42
3.5 Przebieg badań EA rur skręcanych 45
3.5.1 Autokalibracja 45
3.5.2 Test ołówkowy 46
3.6 Układ pomiaru EA butli kompozytowych 46
3.7 Testy przygotowawcze pomiaru EA butli kompozytowych 47

4 Część doświadczalna **50**
4.1 Badania rozpoznawcze długowłóknistych kompozytów epoksydowo-szklanych (ES) 50
4.1.1 Opis badań 52
4.1.2 Podsumowanie badań wstępnych 52
4.2 Badania ciśnieniowe nawijanych rur ES 52
4.2.1 Dobór nawoju i wykonanie próbek 53

4.2.2 Przebieg badań ciśnieniowych 55
4.2.3 Obserwacje rury przezroczystej po badaniach ciśnieniowych 57
4.2.4 Oznaczenie przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej . . 58
4.2.5 Podsumowanie badań ciśnieniowych rur 60
4.3 Badania rur ES na skręcanie 61
4.3.1 Analiza stanu naprężenia rur skręcanych 61
4.3.2 Parametry rur próbnych 62
4.3.3 Dobór nastaw nawijarki 62
4.3.4 Analiza jakości uzyskanego kompozytu 65
4.3.5 Stanowisko badawcze 65
4.3.6 Przebieg badań 67
4.3.7 Analiza obrazu EA i wytrzymałości próbek 68
4.3.8 Mikroskopowa analiza materiału ścianki rur skręcanych 78
4.3.9 Podsumowanie badań rur ES na skręcanie 80
4.4 Badania wysokociśnieniowych butli ES 81
4.4.1 Dobór nawoju 81
4.4.2 Wykonanie butli próbnych 83
4.4.3 Program badań 86
4.4.4 Stanowisko badawcze 87
4.4.5 Układ ciśnienia 87
4.4.6 Układ tensometrycznego pomiaru odkształcenia 90
4.4.7 Wyniki pomiarów odkształcenia butli 91
4.4.8 Wyniki badań EA 93
4.4.9 Oznaczenie przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej . . 100
4.4.10 Podsumowanie badań butli 101

5 Wnioski i uwagi końcowe **102**

Streszczenie

W pracy badano wpływ struktury ułożenia pasm ciągłego włókna szklanego w ściance kompozytowych elementów walcowych na ich własności wytrzymałościowe.

Przedstawiono tablicową metodę analizy nawijania, która w prosty sposób podaje wszystkie możliwe do zrealizowania sposoby nawinięcia włókna, przy założeniu uzyskania regularnej sieci. Pokazano przykłady wyznaczania nawojów dla wybranych parametrów. Wykonano także program komputerowy do rysowania tablic nawojów, który na podstawie wybranego wiersza tablicy wykreśla nawój. W załączniku do pracy przedstawiono rysunki tablic oraz rysunki poszczególnych nawojów.

Przeprowadzono analizę wytrzymałościową w ściance badanych elementów kompozytowych wykorzystując metody analityczne. Porównano wyniki tych obliczeń oraz omówiono je w odniesieniu do wyników uzyskanych z badań doświadczalnych i zamieszczono w załączniku do pracy.

W celu zbadania wpływu rozmieszczenia wiązek rowingu szklanego w ściance elementu kompozytowego na rozwój uszkodeń, obraz odkształceń i wytrzymałość końcową przeprowadzono następujące badania:

- Badania rozpoznawcze, wykonane na oprzyrządowaniu NOL (Naval Ordnance Laboratory) [1, 2, 14, 63, 78] (punkt 4.1, strona 50).
- Badania ciśnieniowe rur według dwóch sposobów obciążania z pomiarem ciśnienia niszczącego oraz oznaczeniem przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej (punkt 4.2, strona 52).
- Badania rur na skręcanie z pomiarem momentu skręcającego, kąta skręcenia próbki, efektów emisji akustycznej (EA) z obserwowaniem mikroskopowym zgładów badanego kompozytu (punkt 4.3, strona 61).
- Badania ciśnieniowe butli próbnych z pomiarem przyrostu ciśnienia, objętości cieczy, efektów EA oraz oznaczeniem przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej i metodą tensometrii oporowej (punkt 4.4, strona 81).

Sformułowano także wnioski i zalecenia przydatne w projektowaniu i wytwarzaniu kompozytów metodą nawijania. Mają one na celu uzyskanie lepszych własności wytrzymałościowych elementów nawijanych. Proponowane zalecenia dotyczą rozmieszczania pasm w elementach kompozytowych wykonywanych metodą nawijania.

Keywords: *filament winding, natting analysis, matrix method, reinforced plastics, pressure pipes, torsional pipes, pressure vessels, glass fibre, epoxy resin, acoustic emission.*

Praca była częściowo finansowana z projeku badawczego nr 7 T08D 017 10, nr umowy 294/-T08/96/10, pt. *Wpływ struktury na wytrzymałość ES zbiorników wysokociśnieniowych.*

Zestawienie oznaczeń

a_i – współczynnik reszty skoku nawijania dla nawoju o numerze i, $a_i = \frac{N_r i}{Z}$,
D – średnica zewnętrzna elementu,
d – średnica rdzenia (wewnętrzna elementu),
d_w – średnica elementarnego włókienka szklanego – $d_w = 0.01mm$,
E – moduł Younga,
e – szerokość wiązki nawijanej (np. rowing szklany),
e_x – szerokość wiązki w płaszczyźnie przekroju prostopadłego do osi rdzenia (rys. 2.4, strona 23),
f – współczynnik wzmocnienia,
f_w – współczynnik udziału syciwa w obwodowych laminatach ES wykonywanych techniką nawijania f_w=0.29 [14],
G – moduł sprężystości poprzecznej,
g – grubość płaszcza kompozytowego,
g_o – grubość ścianki przenoszącej naprężenia obwodowe w części walcowej butli na długości skoku s,
g_w – grubość ścianki przenoszącej naprężenia wzdłużne w części walcowej butli oraz grubość jednej warstwy w obliczeniach MES,
J – liczba pasm rowingu szklanego na długości skoku nawijania (iloczyn liczby nawrotów w warstwie, liczby *warstw* i liczby pasm w rowingu),
J_o – liczba pasm rowingu na długości skoku nawijania s przenoszących naprężenia obwodowe σ_o w części walcowej,
J_w – liczba pasm w przekroju poprzecznym przenoszących naprężenia wzdłużne σ_o w części walcowej,
K_w – liczba warstw w obliczeniach MES,
k – liczba skoków, $k \in N$,
L – teoretyczna długość butli,
l – droga przebyta przez suport,
l_{as} – długość pasma potrzebna do wykonania nawoju o długości as,
l_b – długość butli,
$\bar{l}$ – średnia długość wiązki nieprzeplecionej (wyrażana w szerokościach wiązki e),
l^T – długość części walcowej elementu nawijanego z tolerancją T,
l_p – długość wiązki rowingu w końcowym elemencie rurowym,
l_s – długość wiązki rowingu w nawoju (*warstwie*) o długości s,
M_s – moment skręcający próbkę rurową,
$N_r(i)$ – nawój o numerze i,
n – liczba podziału obwodu rdzenia elementu nawijanego, $n \in N$, rys. 2.4, strona 23,
P – ciśnienie cieczy,
P_{omax} – największe ciśnienie jakie zdoła przenieść kompozytowy płaszcz nośny w kierunku obwodowym w części walcowej,
P_{wmax} – największe ciśnienie jakie zdoła przenieść kompozytowy płaszcz nośny w kierunku wzdłużnym w części walcowej,
p – parametr przeskoku, długość łuku o promieniu $r = d/2$, którego początkiem jest punkt przejścia wiązki z powierzchni walcowej na dennicę, a końcem jest punkt przejścia z dennicy na powierzchnię walcową (rys. 2.10, strona 29),
R_k – promień obrysu zewnętrznego dennic butli,

R_w – promień obrysu zewnętrznego laminatu o grubości g_w,
r_k – promień dennicy zbiornika wewnętrznego,
s – skok nawijania – jest to droga jaką przebędzie suport przy pełnym obrocie rdzenia,
T – tolerancja długości wykonania kompoztyowego elementu nawijanego,
t – czas,
V_p – udział pustek (pęcherzy powietrza i por) w materiale ES,
v – prędkość ruchu suportu,
v_o – prędkość obwodowa rdzenia,
W – wytrzymałość właściwa,
W_{os} – powierzchnia przekroju części walcowej $s \cdot g_o$, przenoszącej naprężenia obwodowe,
W_{ow} – osiowa powierzchnia przekroju części walcowej przenoszącej naprężenia wzdłużne,
W_r – wytrzymałość kompozytu na rozciąganie,
Z – liczba nawrotów suportu (nawroty z prawej i lewej strony nawijarki) $Z = 2 \cdot n = N_r/a$,
α – kąt nawijania,
β – kąt określający kierunek osi **a** układu współrzędnych materiału warstwy pierwszej w MES,
ε_{CDS} – odkształcenie odpowiadające stanowi nasycenia pęknięciami poprzecznych warstw,
ε_p – odkształcenie odpowiadające początkowi pękania poprzecznego,
ε_r – odkształcenie niszczące,
ε_{spl} – odkształcenie odpowiadające początkowi pęknięć wzdłużnych,
ν – współczynnik Poissona,
ρ – gęstość,
$\sigma_{1,2,3}$ – naprężenia główne,
σ_f – naprężenie w kierunku nawiniętych włókien szklanych,
σ_{max} – naprężenie zrywające jednokierunkowego kompozytu ES,
σ_o – naprężenie obwodowe w części walcowej,
σ_{ok} – naprężenie obwodowe w dennicy,
σ_p – naprężenie początku pęknięć poprzecznych warstw rozciąganych, prostopadle do wzmocnienia,
σ_w – naprężenie wzdłużne w części walcowej,
σ_{wk} – naprężenie wzdłużne w dennicy,
σ_{3kr} – krytyczne naprężenie ścinające kompozytowej rury skręcanej,
τ – naprężenia styczne,
ϕ – kąt skręcenia próbki rurowej oraz kąt parametru przeskoku,
ω – prędkość kątowa rdzenia.

Terminologia

butla – jednoprzestrzeniowy zbiornik nieizolowany o pojemności nie przekraczającej $150dm^3$ [114],

CDS – charakterystyczny stan uszkodzenia – „characteristic damage state" [95] (patrz strona 10),

dennica – zakończenie części walcowej butli, najczęściej sferyczne, elipsoidalne lub torisferyczne [81],

EA – emisja akustyczna,

EG – kompozyt epoksydowo-grafitowy,

ES – kompozyt epoksydowo-szklany,

EW – kompozyt epoksydowo-węglowy,

felicity – występowanie rejestrowalnego natężenia EA przy określonej stałej czułości poziomu rejestracji sygnału EA dla naprężenia niższego niż poprzednio stosowanego (lub wywołanego warunkiem pracy) poziomu naprężeń – stosunek tych naprężeń podaje tzw. ułamek felicity wyrażany w [%] [79],

grupa nawojów – cztery nawoje z tablicy charakteryzujące się tym samym widokiem jakościowym, liczbą przeplotów lecz innymi współczynnikami skoku nawijania a (punkt 2.2.3, strona 24),

IEL/OW – Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego, ul. Curie-Skłodowskiej 55, 50–370, Wrocław,

IMMT – Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, ul. Smoluchowskiego 25, 50–370 Wrocław,

kinking – mikromechanizm zniszczenia kompozytu włóknistego, polegający na wyboczeniu włókien ściskanych z utworzeniem uskoku (rys. 4.24, strona 78),

kompozyt długowłóknisty – kompozyt wykonany z włókna ciągłego np. metodą nawijania lub przeciągania (pultruzji),

M–sygnał – wartość wyznaczana przez elektroniczną kalibrację jako wskaźnik adhezyjnych połączeń,

impuls N_c – wartość zarejestrowana przy łamaniu wzorca ołówkowego na rurze od punktu kalibracji w dwóch odległościach pod kątem 45° tak, aby odczyt w *[dB]* był pomiędzy poziomami niskich i wysokich amplitud,

NOL – Naval Ordnance Laboratory, metoda badania wytrzymałości kompozytu wykonanego w postaci pierścieni osadzonych na specjalnym uchwycie [1, 2, 14, 78, 63],

nawijanie obwodowe – kąt nawijania $\alpha \approx 90°$, skok $s = e$, współczynnik $a = 0$ lub $a = 0.5$ lub $a = 1$ dla wszystkich tablic nawojów,

nawijarka – urządzenie podobne do tokarki, służące do wykonywania elementów kompozytowych metodą nawijania (rys. 2.1, strona 18),

nawój – uporządkowanie włókna na rdzeniu — po pewnej parzystej liczbie nawrotów $Z = 2n$ (gdzie $n \in \mathrm{N}$) punkty na osi wiązki w początku nawijania pokrywają się z punktami końca nawijania,

pasmo – np. rowingu szklanego, składa się z 204 włókienek elementarnych (najczęściej spotyka się rowingi 30, 60, 120 lub 240 pasmowe),

preparacja – cienka warstwa na powierzchni włókna, np. szklanego, polepszająca, np. zwilżalność włókna szklanego syciwem,

przeplot – układanie wiązek rowingu w czasie nawijania, dające w końcowym efekcie widok tzw. „splotu koszykowego", (rys. 2.8, strona 26),

rdzeń – najczęściej walcowy, odtwarzający wnętrze kompozytowego elementu nawijanego,

RMS – (root mean square) średnia wartość napięcia skutecznego – wielkość energii niesionej przez szum. Wartość zmiennej wyznaczana jest jedynie pomiędzy zdarzeniami akustycznymi (w czasie „ciszy"), wyliczana jest na podstawie napięcia na wejściu przedwzmacniacza i podawana w [μV] proporcjonalnych do amplitudy – 0 dB = 1 μV, 20 dB = 10 μV, 40 dB = 100 μV, itd.,

rowing – np. szklany, składający się z pasm zawierających 204 szklane włókienka elementarne,

splitting – pęknięcia osnowy rozchodzące się wzdłuż włókien,

struktura nawijania – ułożenie pasm rowingu w elemencie kompozytowym wykonanym metodą nawijania – pojęcie szersze od nawoju, szerzej omówiono w punkcie 1.1, strona 15,

tex – współczynnik charakteryzujący grubość rowingu – $[g/km]$,

warstwa – jest to nawój, który pokrył równomiernie rdzeń, przy zadanej szerokości wiązki, np. rowingu szklanego, tworząc równomierną sieć – w tak powstałej sieci wiązki równoległe stykają się ze sobą i w każdym punkcie na powierzchni rdzenia znajdują się tylko dwie (górna i dolna, zorientowane pod kątem $+\alpha$ i $-\alpha$) – w niniejszej pracy *warstwa* wykonana techniką nawijania jest pisana *kursywą*, ponieważ ma ona inny charakter od warstwy wykonanej z płótna szklanego – szersze omówienie przedstawiono w punkcie 2.2.3, strona 24,

wiązka – np. rowingu szklanego składająca się z pasm (najczęściej spotyka się rowingi 30, 60, 120 lub 240 pasm w wiązce),

włókno ciągłe – nieskończenie długa wiązka rowingu szklanego,

współczynnik reszty skoku nawijania – a_i – określa drogę ruchu suportu nawijarki jako: $l = k \cdot s + a_i \cdot s, [mm]$,

wytrzymałość właściwa – stosunek wytrzymałości na rozciąganie kompozytu do jego gęstości – $W_r = W/\rho$.

Rozdział 1

Wstęp

Wśród aktualnych problemów naukowych i inżynierskich szczególne miejsce zajmuje zagadnienie projektowania i wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych ze sterowanymi właściwościami fizykomechanicznymi. Takimi materiałami są kompozyty. Spośród różnych kombinacji najlepsze własności mechaniczne uzyskuje się w przypadku zespolenia mocnych, długich włókien z jednorodnym, chemicznie utwardzalnym syciwem polimerowym. Są to tzw. kompozyty wzmocnione włóknem ciągłym lub kompozyty długowłókniste [27, 66, 117]. Ich podstawową zaletą użytkową jest duża wytrzymałość właściwa. Wytrzymałość właściwa kompozytu ES (epoksydowo–szklanego) znacznie przewyższa wytrzymałość dobrych gatunków stali i stopów metali. Z ważnych zagadnień, które często są pomijane, tworzywa wzmocnione włóknem ciągłym charakteryzuje:

- niejednorodność struktury,
- duża anizotropia własności,
- bardzo duża wrażliwość na technologię wykonania i czynniki konstrukcyjne,
- wrażliwość na stan powierzchni międzyfazowej.

Obecnie jednym z najbardziej uniwersalnych sposobów wytwarzania kompozytów długowłóknistych jest metoda nawijania [16, 48, 65, 72, 73, 97, 106]. Stosowana jest do przemysłowego wytwarzania profili konstrukcyjnych, rur, zbiorników i butli. Wymienione wyroby mogą służyć do magazynowania oraz transportu różnych gazów, chemikaliów i substancji technicznych [8], a także jako elementy elektroizolacyjne [13]. Coraz częściej metodę nawijania wykorzystuje się nawet w produkcji korbowodów czy kominów dla przemysłu chemicznego [113]. Znaczenie kompozytowych elementów ciśnieniowych związane jest z wymaganiami jakie obecnie stawia się nowoczesnym urządzeniom. Np. krajowy sprzęt lotniczy, aby mógł konkurować z zagranicznym, musi być wyposażony w podzespoły o dobrej jakości i wysokich parametrach eksploatacyjnych, gdzie wiele z kluczowych podzespołów jest wykonanych z nawijanego kompozytu ES. Zaletami, dzięki którym np. butle kompozytowe górują nad butlami metalowymi są:

- brak iskrzenia przy otarciach i uderzeniach,
- lekka konstrukcja,
- brak odłamków w razie zniszczenia (np. przestrzelenia) butli,
- duża odporność chemiczna,
- niski koszt produkcji małoseryjnej,
- brak wyraźnego przejścia plastyczno-kruchego w niskich temperaturach.

W procesie projektowania i wykonywania metodą nawijania, np. rur, butli i innych elementów kompozytowych napotyka się na wiele problemów, głównie związanych ze strukturą. Zagadnienia te omawiano w [27, 55, 65, 66, 72, 73, 97, 116, 117]. Opracowanie wyrobu z materiału kompozytowego ujmuje następujące etapy postępowania:

- obliczenia wytrzymałościowe,
- dobór materiałów,
- badania sprawdzające,
- ponowne obliczenia wytrzymałościowe,
- opracowanie konstrukcji,
- dobór parametrów nawijania,
- opracowanie technologii,
- wykonanie wyrobu.

Podstawowy problem wytrzymałości elementów kompozytowych poddanych działaniu obciążeń statycznych, zmęczeniowych czy korozji [41] to rozwijające się różnego rodzaju uszkodzenia kompozytu. Są one następujące:

- odspojenie na granicy międzyfazowej włókno–lepiszcze, adhezyjne lub kohezyjne,
- pęknięcia osnowy typu mostek pomiędzy odspojeniami, w kierunku prostopadłym do obciążenia (stan CDS – nasycenie laminatu pęknięciami tego typu),
- pęknięcia osnowy typu *splitting*, rozchodzące się wzdłuż włókien,
- pęknięcia translaminarne osnowy rozchodzące się w poprzek włókien, które w późniejszym etapie powodują powstawanie rozwarstwień,
- pęknięcia włókien.

Przy obciążeniu kompozytu polimerowego dobrej jakości (prawidłowo dobrana preparacja włókna, rodzaj syciwa, prawidłowo przeprowadzona technologia wykonania oraz optymalna struktura ułożenia wiązek), najczęściej jako pierwsze pojawiają się odspojenia osnowy od włókna oraz pęknięcia osnowy rozchodzące się w poprzek włókien – mostki. Pęknięcia te zależą od orientacji zbrojenia i kierunku działającego obciążenia. Dla kompozytu ES, w zależności od grubości warstwy poprzecznej syciwa, np. wahającej się od 0.1 do 0.5 mm, jej pęknięcia poprzeczne występują dla odkształceń $\varepsilon_p = 0.4 \div 1.8$ %. Natomiast dla kompozytu epoksydowo–węglowego (EW) wartości tych odkształceń są dwa razy większe [9]. Następnymi są pęknięcia wzdłuż warstw nośnych osnowy, łączące się później z pęknięciami poprzecznymi osnowy tworząc rozwarstwienia. Występują one przy odkształceniach $\varepsilon_{spl} = 1.1 \div 2.2$ %. Jako ostatnie występują pęknięcia włókien na kierunkach nośnych. Pęknięcia wzdłużne włókien występują rzadko i towarzyszą pęknięciom poprzecznym osnowy. Różnice sztywności, rozszerzalności cieplnej i wytrzymałości syciwa oraz włókna powodują powstanie w kompozytach złożonego stanu naprężeń i odkształceń. W przypadku jednokierunkowego rozciągania kompozytu w kierunku prostopadłym do włókien, różnice we właściwościach sprężystych włókna i osnowy powodują, że prawie całe wymuszone odkształcenia przejmuje syciwo znajdujące się pomiędzy poprzecznymi włóknami. Wydłużenie względne osnowy polimerowej jest zawsze większe niż względny przyrost długości elementu kompozytowego. Maksymalne odkształcenie osnowy przy dobrym upakowaniu włókien jest około 20 razy większe od całkowitego odkształcenia kompozytu przy założeniu stosunku modułów równego 20 [29]. Przy rozciąganiu wielowarstwowego kompozytu o wzmocnieniu ortotropowym już przy stosunkowo niewielkim odkształceniu średnim, znacznie poniżej odkształcenia przy zerwaniu,

w pasmach poprzecznego wzmocnienia występuje przeciążenie osnowy polimerowej. Jej odkształcenie jest kilkakrotnie większe od średniego odkształcenia kompozytu. Po przekroczeniu pewnego odkształcenia krytycznego ε_p w pasmach poprzecznego wzmocnienia pojawiają się mikropęknięcia. Mogą one mieć dwojaki charakter, zależnie od preparacji (jakości obrobionej powierzchni włókien) – adhezyjne lub kohezyjne. Odkształcenie kompozytu, odpowiadające pojawieniu się pierwszych pęknięć wywołanych działaniem zewnętrznego, quasi-statycznego obciążenia rozciągającego, jest dla większości kompozytów takie samo i wynosi 0.3% [86]. Jest to pierwsza faza dekohezji oraz moment pierwszej EA. W miarę wzrostu obciążenia, mikropęknięcia powstałe w pierwszej fazie uszkodzenia propagują i tworzą pęknięcie translaminarne. Gęstość tych pęknięć bardzo szybko osiąga wartość stałą, charakterystyczną dla danego rodzaju kompozytu. Efekt ten badany był przez Raifsnider'a [95], który zaproponował nazwę: *charakterystyczny stan uszkodzenia – „characteristic damage state"*, w skrócie CDS . Stan nasycenia kompozytu pęknięciami CDS odpowiada 3–4 pęknięciom na długości $1mm$. Takie pęknięcia znajdowano również przy obserwacjach zgładów badanych rur ES. CDS jest określona tylko przez właściwości poszczególnych warstw kompozytu oraz przez kolejność ich ułożenia. Także nie zależy od historii obciążenia, geometrii elementu, naprężeń termicznych, itp. CDS odzwierciedla stan odkształcenia, naprężenia i wytrzymałości kompozytu jako dobrze zdefiniowana miara uszkodzenia, przydatna w analizie dekohezji. Naprężenia, przy których obserwuje się CDS, są znacznie niższe od naprężeń niszczących. Mechanizm ten nie musi decydować o zniszczeniu kompozytu, lecz w analizie wytrzymałościowej powinien być uwzględniany. Powstanie mikropęknięć już przy niewielkim poziomie naprężeń powoduje zmianę współczynnika Poissona. Jest to jedna z przyczyn dużych rozbieżności pomiędzy wartością zmierzoną a wyznaczoną teoretycznie. Z tego też względu w modelach wytrzymałości kompozytów nie można bezkrytycznie stosować teorii sprężystości, która oparta jest na założeniu kontinuum materialnego.

Postępująca liczba uszkodzeń wpływa na spadek właściwości mechanicznych. Ulegają zmianie np. stałe sprężystości [49, 88], wartości współczynników tłumienia drgań, przewodności cieplnej i gęstość materiału [21]. Pęknięcia wychodzące na zewnątrz płaszcza nośnego butli czy rurociągu znacznie ułatwiają infiltrację wody i mediów korozyjnych do wnętrza konstrukcji kompozytowej, uruchamiając rozwój korozji naprężeniowej [41, 65]. W projektowaniu i budowie odpowiedzialnych części nośnych konstrukcji wspomniane zjawiska zmuszają do przyjmowania w obliczeniach wytrzymałościowych wysokich współczynników bezpieczeństwa. Np. dla zbiorników ciśnieniowych osiągają one wartość od 6 do 15. W obliczeniach konstrukcji lotniczych wartości odkształceń nie mogą przekraczać $\varepsilon < 0.3 \div 0.4$ %. Natomiast w konstrukcjach narażonych chemicznie współczynniki bezpieczeństwa mogą osiągnąc nawet wartość 20 do 30, a czas eksploatacji nie przekracza dwóch lat (wg normy francuskiej NFT57900 i brytjskiej BS4994 [9]).

Obserwuje się rosnące zainteresowanie kompozytami hybrydowymi [22, 52], zawierającymi obok włókien szklanych włókna węglowe, aramidowe i inne [48]. W szczególności stosowane są one do wytwarzania butli wysokociśnieniowych, pracujących w różnych warunkach eksploatacji. Dzięki zastosowaniu bardziej sztywnych włókien, które również lepiej współpracują z osnową polimerową [9], znacznie podwyższono parametry eksploatacyjne kompozytowych elementów nawijanych. Obecnie firmy produkujące butle z kompozytów hybrydowych to: Composite Aquitaine, EDO Corporation, Raufoss A/S, MAN Technologie, Luxfer, Rutgers, Ciba, Scott, Structural. Coraz częściej w odpowiedzialnych kon-

strukcjach, np. pojazdów trakcyjnych, spotyka się butle ciśnieniowe, których płaszcz nośny zbrojony jest w całości włóknem węglowym, a ostatnio wyłącznie włóknem aramidowym ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji. Jako syciwo stosowane są żywice epoksydowe.

Różnice w zachowywaniu się materiałów kompozytowych wykonanych z różnym zbrojeniem są łatwo obserwowalne przy badaniach wykorzystujących EA. Przy pomiarze energii EA obciążanego kompozytu epoksydowo-aramidowego zauważono, że ulega on zniszczeniu według innego mechanizmu niż kompozyty ES i EW. Butle ciśnieniowe EW pękają w bardzo kruchy sposób w porównaniu ze zbiornikami zbrojonymi dwoma pozostałymi materiałami. Również badania materiału kompozytowego złożonego z dwóch różnych typów włókien (węglowych i grafitowych) wykazują wyższy poziom EA w porównaniu do materiału kompozytowego zawierającego jeden typ zbrojenia. A zatem EA jest tutaj bardzo ważnym sposobem obserwacji zachowywania się zbrojenia w kompozycie [100]. W pracy [51] pokazano, że zbiorniki ciśnieniowe z włókien aramidowych i grafitowych, gdzie EA pojawia się przy wyższych ciśnieniach, mają mniej sztywną matrycę epoksydową, tak więc wyniki EA mogą być użyte do badania mechanizmów uszkodzenia materiału matrycy i wprowadzania takich zmian technologii, które ulepszą kompozyt.

W pracy [73] podano tabelę norm ASTM, wg których bada się elementy wykonywane metodą nawijania. Kompozytowe butle ciśnieniowe muszą spełnić wiele ostrych norm [3, 4, 5, 8, 9, 35, 64, 74, 79]. Każda butla poddawana jest próbie odkształcenia przy ciśnieniu próbnym (minimum 1.5 ciśnienia roboczego), zmiana objętości nie może przekroczyć 5%. Innym wymogiem jest poddanie butli, z partii 200 szt., próbie ciśnień hydrostatycznych (3750 cykli) do ciśnienia próbnego, a następnie rozerwanie. W wyniku rozerwania nie może powstać więcej niż trzy części. Natomiast projekt nowej normy francuskiej [35] nie dopuszcza fragmentacji w żadnej próbie. Inne próby, po których następuje rozerwanie – a ciśnienie rozerwania jest miarą zaliczenia testu – to: test udarowy, upuszczanie z wysokości 1.2 m na odpowiednio ukształtowaną pryzmę stalową 5 razy i dodatkowo 12000 cykli przy ciśnieniu 300 *barów*, próba wygrzewania w 70° przez 1000 godz., test ogniowy, ostre cykle testów środowiskowych (wilgoć, szoki termiczne od 60° do −50°), próba wad materiałowych polegająca na nacinaniu płaszcza nośnego piłą diamentową na głębokość 50% grubości kompozytu, próba strzału z broni palnej i wiele innych. Wymienione próby wskazują, iż stawia się wysokie wymagania wykonaniu butli kompozytowych. Zmusza to producentów do uwzględniania wszystkich istotnych parametrów technicznych podwyższających jakość wykonywanych butli. W projektowaniu kompozytowych butli ciśnieniowych ważnym elementem jest znalezienie pewnego optimum pomiędzy kosztem wykonania butli a jej przeznaczeniem, przy założeniu spełnienia obowiązujących norm [8, 9, 35, 74, 79]. Wspomniane optimum można osiągnąć przy oszczędnościach materiałowych, np. stosując 10 razy tańsze od węglowego włókno szklane lub wykorzystując oryginalną technologię. Firma Luxfer [74] oferuje butle metalowe wykonywane sposobem tradycyjnym, przez tłoczenie, np. aluminium. W części walcowej tak uzyskanych butli nakładane są warstwy włókna w kierunku obwodowym. Ma to na celu zrównoważenie naprężeń obwodowych do wzdłużnych, panujących w płaszczu nośnym butli. Zrównoważenie to można obliczyć, stosując podstawowe równanie teorii powłok [80] lub zależności zamieszczone w [114] lub budując elipsę naprężeń wg wybranej hipotezy [37, 117]. Dodatkowo Firma Luxfer, w końcowym etapie po utwardzeniu syciwa, poddaje butle tzw. przeprężaniu. Rozumie się przez to proces ciśnieniowy, przewyższający ciśnienie próbne. Przy tym poziomie naprężeń przekroczona zostaje granica plastyczności aluminium. Po

przywróceniu ciśnienia zerowego aluminium ulega ściskaniu, a nawinięty kompozyt – rozciąganiu. Dlatego przy normalnym ciśnieniu roboczym naprężenia powstałe we wkładzie aluminiowym są mniejsze niż w standardowej butli aluminiowej.

Inny sposób to produkcja butli metodą drosthalm [73]. Sposób ten polega na równoczesnym nawijaniu na rdzeń włókna obwodowego pod kątem ok. 90° oraz równoczesnym podawaniu włókna ciętego w postaci maty. Chaotycznie rozmieszczone włókno cięte w płaszczu nośnym butli przenosi naprężenia wzdłużne. Można oczekiwać nowych, ulepszonych metod nawijania i stosowania nawijania kombinowanego, np. włókna szklanego na rury PCW. Inna możliwość wykonywania kompozytowego płaszcza nośnego to naniesienie ciętego włókna szklanego na powierzchnie rdzenia metodami przedstawionymi w [65, 72, 73, 97]. Następnie przeprowadzenie prasowania ciśnieniowego naniesionych warstw włókna. Te metody formowania mogą umożliwić otrzymanie unikalnych konstrukcji, w których masa jest najważniejszym czynnikiem decydującym.

Dla butli wykonywanych metodą nawijania wielu autorów proponuje różne sposoby ułożenia pasm wzmacniających. W pracach [72, 73, 97] podano sposoby nawijania butli, w których kąt nawijania α jest określony przez: długość butli, kształt dennicy oraz średnicę końcówek. Wzmocnienie w kierunku obwodowym, w tak wykonanym płaszczu nośnym, uzyskuje się przez dodatkowe nawinięcie warstw obwodowych ($\alpha \approx 90°$). Ten sposób nawijania butli opisano w pracy [61], stosując nawój z równomiernie rozmieszczonymi przeplotami. Do nawijania butli proponują oni nawój, dla którego reszta skoku nawijania a wynosi około 1/6. Z treści tego artykułu nie wynika, iż nawój ten jest optymalny z punktu widzenia jego struktury. W pracy [61], podobnie jak w pracach [72, 73, 97], zastosowano wzmocnienie laminatu krzyżowego warstwą obwodową, w celu spełnienia warunku równowagi naprężeń obwodowych i wzdłużnych. Opracowanie [61] zawiera również opis programu komputerowego z szeroko rozbudowaną grafiką do projektowania kompozytowych butli ciśnieniowych.

W artykule [39] podano metodę projektowania butli, rurociągów i zbiorników kompozytowych w oparciu o normę angielską – BS3532. Metodą nawijania wykonano i przebadano szereg rur, różniących się kątem nawijania włókna szklanego w granicach $0° \leq \alpha \leq 90°$. Wyniki badań rur, przy obciążaniu jedno i dwuosiowym, przedstawiono na wykresach (stosunek odkształcenia do naprężeń tnących i głównych, stosunek naprężeń normalnych, stosunek naprężeń normalnych i stycznych w funkcji kąta nawijania). Zdaniem autora artykułu, wykresy te mogą być przydatne w projektowaniu elementów wykonywanych metodą nawijania. Jednak autor nie wspomina nic o strukturze nawoju oraz jaki może mieć ona wpływ na wyniki przeprowadzonych badań.

Z obserwacji fotografii, zamieszczonych w materiałach reklamowych wyżej wspomnianych firm, wynika, że problem doboru optymalnego nawoju nie jest jeszcze rozwiązany. Także w dostępnej literaturze nie porusza się problemu wyboru nawoju optymalnego ze względu na wytrzymałość kompozytowego elementu nawijanego. Również obliczenia wytrzymałościowe kompozytów nawijanych są analogiczne do obliczeń innych typów materiałów warstwowych z ułożonymi pod kątem warstwami komponentów wzmacniających. Zagadnienia te mogą być rozpatrywane w dwojaki sposób [27, 72, 73, 81, 97, 117]:

— z pozycji makromechaniki analiza kompozytów polega na założeniu, że każda warstwa jest anizotropową, jednorodną monowarstwą; właściwości monowarstwy zwykle określa się drogą eksperymentalną i analizę struktury prowadzi się drogą przechodzenia od jednej warstwy do drugiej [27, 73, 81],

— podejście mikromechaniczne, czyli analiza polegająca na badaniu charakterystyk wytrzymałościowych składowych części materiału t.j. rozkładu naprężeń i deformacji między włóknami wzmacniającymi i osnową [37]. Ta analiza naprężeń określa jakie obciążenia może wytrzymać materiał przed osiągnięciem naprężeń krytycznych. Podejście mikromechaniczne stosuje się też do wyznaczenia charakterystyk materiału kompozytowego zależnie od właściwości jego komponentów. [27, 73, 81, 97, 117].

Opracowanie konstrukcji płaszcza nośnego to analiza usieciowania, która powszechnie sprowadza się do wyznaczania kąta nawijania, a następnie wyznaczenia naprężeń wzdłużnych i obwodowych, w zależności od grubości warstw. Należy zaznaczyć, iż w laminatach wykonanych metodą nawijania nie ma wyraźnej granicy pomiędzy *warstwami* tak jak w laminatach z płótna, np. szklanego. Wynika to z indywidualnego układania pasm, np. rowingu szklanego, a używane pojęcie *warstwy* w przypadku laminatów nawijanych jest umowne [16] i odnosi się do równomiernej sieci powstałej w wyniku nawinięcia wiązki.

Dla osiągnięcia większej dokładności w projektowaniu, korelację między wartościami teoretycznymi a empirycznymi przedstawiono na tabelach [73]. Podano tam współczynniki charakteryzujące kompozyt w zależności od kąta nawijania dla stałej objętości szkła (50%). W pracy [73] zwrócono uwagę, iż teoretyczne aproksymacje głównych właściwości materiałów kompozytowych mogą mieć zastosowanie do szkicowego projektowania i uzyskania danych o zachowaniu się materiałów. Wskazano również, iż określenie właściwości kompozytu na podstawie właściwości ich składników jest na ogół nieprawdziwe. Określenia współczynnika Poissona ν, modułów sprężystości E i G oraz innych współczynników można dokonać stosując jedną z metod zamieszczonych w [37]. Elementy kompozytowe wykonywane techniką nawijania są łatwiejsze do obliczeń wytrzymałościowych, ponieważ z góry wiadomo ile włókna zawiera materiał oraz jak jest ono zorientowane. Takie podejście do materiału przedstawiono w [55] oraz wykorzystano w obliczeniach butli próbnych i przedstawionych w załączniku.

Zdaniem autora niniejszej pracy w zakres zadań związanych z analizą usieciowania powinno wchodzić rozwiązanie problemu wyboru nawoju, ponieważ wybór optymalnego kąta nawijania elementu kompozytowego oraz wybór optymalnych składników (lepiszcze, włókno i preparacja) nie wyczerpuje możliwości znacznego zwiększenia wytrzymałości kompozytu wykonanego metodą nawijania. Problem wyboru nawoju można ocenić jedynie drogą eksperymentalną, polegającą na badaniu nawijanych elementów kompozytowych z różnymi nawojami, posługując się następującymi metodami badawczymi:

- obserwacjami mikroskopowymi wypolerowanych powierzchni przekroju próbek [28, 41, 123],
- rentgenografią próbek impregnowanych jodkiem cynku lub chlorkiem złota [104],
- emisją akustyczną (EA) [17, 18, 20, 22, 41, 45, 79, 57, 121, 122],
- analizą krzywej obciążania [9],
- analizą zmian modułu Younga E [49, 58, 88],
- wyznaczeniem przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej [11, 24, 25],
- metodą ultradźwiękową [46],
- spektometrią dielektryczną [59],
- techniką zatapiania włókien grafitowych, przewodów piezoelektrycznych lub włókien światłowodowych [10].

Obraz wypolerowanej powierzchni bocznej próbki, obserwowany pod mikroskopem optycznym lub elektronowym, często może wyjaśnić mechanizm powstawania uszkodzeń. Pewne cechy charakterystyczne siatki pęknięć widoczne pod mikroskopem mogą umożliwić ustalenie przyczyn powstawania i rozwoju uszkodzenia, będącego źródłem zniszczenia elementu nawijanego.

Impregnacja uszkodzonych próbek za pomocą roztworów alkoholowych jodku cynku lub chlorku złota, które mają duży współczynnik absorbcji promieni rentgenowskich, pozwala uzyskać na kliszach złożone obrazy pęknięć poprzecznych, podłużnych oraz rozwarstwień. W celu uzyskania lepszej penetracji roztworu do siatki pęknięć, impregnację można przeprowadzić pod obciążeniem.

Metoda EA jest metodą pośrednią i porównawczą. Jej podstawową zaletą jest możliwość prowadzenia obserwacji zjawisk w czasie, w którym one zachodzą oraz możliwość lokalizacji na bieżąco miejsc powstawania uszkodzeń. Daje to możliwość wykrycia procesów pękania, niewykrywalnych innymi metodami. Istnieje możliwość oceny intensywności narastania pęknięć, np. w trakcie zmiany temperatury próbki. Metoda EA jest szeroko stosowana w świecie przy badaniu kompozytów włóknistych – zwłaszcza w USA. W normach ASTM wykorzystuje się EA do oceny jakości, np. kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych. W Europie powstał projekt normy uwzględniającej uniwersalność metody EA w ocenie jakości zbiorników kompozytowych. Szerzej metodę EA wraz z przeglądem literatury omówiono w rozdziale 3, strona 37.

Powstawanie mikropęknięć już przy niewielkim poziomie naprężeń powoduje zmianę współczynnika Poissona, co jest jedną z przyczyn dużych rozbieżności pomiędzy wartością zmierzoną a wyznaczoną teoretycznie. Materiał pod obciążeniem zmienia również swoje właściwości sprężyste oraz wpływa na np. kształt krzywej rozciągania materiału. Pojawiają się na niej charakterystyczne załamania, obrazujące kolejne etapy pęknięć kompozytu [50]. Jednak takie zjawisko nie zawsze występuje [9].

Stwierdzono, iż w wielu kompozytach występuje zjawisko spadku wartości modułu sprężystości wzdłużnej wraz ze wzrostem siły osiowej. Może to również służyć do określania momentu wystąpienia pierwszych pęknięć wewnątrz kompozytu.

Metoda interferomertii holograficznej [11] jest techniką pomiaru małych przemieszczeń, wykorzystującą zasadę holograficznego zapisu obrazu, zachowującą efekty trójwymiarowości. Jest to metoda o największej czułości oraz analizy jakościowej i ilościowej całych badanych obszarów. Podczas rejestracji hologramów informacja o obiekcie zawarta jest we froncie falowym, rozproszonym na powierzchni obiektu. Informacje są zakodowane w modulacji natężenia i fazy fali świetlnej. Powierzchnia przedmiotu, oświetlona światłem koherentnym, rozpraszając światło zachowuje się jak zbiór wtórnych źródeł światła, wysyłając fale sferyczne.

Zastosowanie metody ultradźwiękowej [46] do badań kompozytów polimerowych jest coraz częstsze. Jest to metoda cienia lub przenikania, polegająca na zastosowaniu dwóch głowic: nadawczej i odbiorczej, między które wkłada się badany element. Pewną odmianą tej metody jest opisywana i stosowana w niniejszej pracy jedna z funkcji zestawu AMS3, opisana w punkcie 3.5.1, strona 45.

Spektometria dielektryczna [59] umożliwia przeprowadzenie nieniszczących badań diagnostycznych konstrukcji kompozytowych, nawet przy dostępie jednostronnym. W tej metodzie jest możliwy pomiar: stałej dielektrycznej, współczynnika stratności i widma relaksacji.

Istnieje także możliwość wykonania kompozytu z zatopionymi włóknami węglowymi, przewodami piezoelektrycznymi lub nitkami światłowodowymi [10], np. w kierunkach zgodnych z kierunkami panujących naprężeń głównych. Następnie wystające nitki światłowodowe podświetla się jednostronnie i obserwuje świecące końce nitek przy pomocy np. kamery CCD. W miarę obciążania elementu zaczynają gasnąć kolejne nitki. Analiza obrazu pozwala ocenić postępującą destrukcję materiału kompozytowego. Taki eksperyment został przygotowany w IMMT.

1.1 Sformułowanie problemu

Główny problem podjęty w niniejszej pracy dotyczy pojęcia *struktura kompozytu nawijanego*. Struktura kompozytu będzie rozumiana w sensie makroskopowym jako sposób ułożenia pasm rowingu w elemencie wykonanym metodą nawijania. Pojęcie struktura jest szersze od pojęcia anizotropii, ponieważ struktura zależy nie tylko od kąta ułożenia wiązek, ale również od sposobu ich ułożenia. Należy zwrócić uwagę na wpływ różnych sposobów ułożenia pasm i związaną z tym wytrzymałość elementu wykonanego metodą nawijania. Na rys. 2.8, strona 26 przedstawiono trzy rodzaje struktur nawijanych, różniących się liczbą i rozmieszczeniem przeplotów, stanowiących rodzaj węzłów. W głównej mierze *struktura kompozytu nawijanego* zależy od przyjętego współczynnika a, określającego drogę ruchu suportu nawijarki. Na pojęcie struktura kompozytu nawijanego składa się:

- wzajemne rozmieszczenie pasm włókien (rowingu),
- przeplot pasm,
- relacja między kątem ułożenia pasm α i kierunkiem działania naprężeń,
- naciąg włókien,
- stosunek zawartości osnowy do zbrojenia (syciwa do włókna),
- zawartość pęcherzy powietrza,
- rodzaj włókna, jego preparacja oraz osnowa,
- procedura prowadzenia procesu technologicznego (temperatura składników w czasie nawijania oraz reżim utwardzania).

W dostępnej literaturze dotyczącej konstruowania, projektowania oraz technologii wykonania struktur kompoztyowych elementów nawijanych (teorie wzmocnienia [27, 37, 81, 117], opisy geometrii nawijania [72, 76, 89, 97]) nie jest poruszany problem różnorodności nawojów. Różnorodność zastosowanych nawojów może być przyczyną rozbieżności wyników badań dotychczas wykonywanych przez wielu badaczy. Wyniki badań autora przedstawione w rozdziale 4 wydają się potwierdzać słuszność powyższego przypuszczenia. Sposobem sprawdzenia słuszności tego przypuszczenia jest przeprowadzenie eksperymentu, opartego o metody badawcze wymienione we wstępie. W pracy ograniczono się do następujących metod:

- EA jako metody porównawczej do oceny zjawisk zachodzących w kompozycie ES w czasie obciążania elementu,
- oznaczenia przemieszczeń elementu ES metodą interferometrii holograficznej w czasie obciążenia,
- pomiarów tensometrycznych w celu określenia odkształceń kompozytu,

- obserwacji mikroskopowych zgładów (wypolerowanych powierzchni bocznych kompozytu nawijanego).

Szczególną uwagę w niniejszej pracy poświęcono metodzie EA uważając, że jest ona najlepszą metodą do oceny jakości kompozytu oraz do oceny mechanizmów destrukcji kompozytu ES. W Stanach Zjednoczonych metoda EA jest już od dawna stosowana jako metoda oceny kompozytowego płaszcza nośnego, np. butli ciśnieniowej [3, 4, 5, 8, 79]. W pracy [73] podane są tabele norm ASTM, wg których bada się elementy wykonywane metodą nawijania. Natomiast w Europie metoda EA jako oryginalna zyskuje sobie coraz więcej zwolenników przy opracowywaniu norm kontrolnych i z pewnością w niedalekiej przyszłości będzie podstawowym narzędziem do oceny jakości kompozytowych elementów nawijanych.

Badania w dziedzinie budowy i własności naczyń ciśnieniowych o płaszczu nośnym z kompozytu ES zapoczątkowano w Instytucie Elektrotechniki we Wrocławiu (IEL/OW) już w roku 1979 [38, 75, 77, 94].

1.2 Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie metody nawijania włókna ciągłego na rdzeń oraz wyłonienie, w drodze badań wytrzymałości walcowych *struktur nawijanych*, różniących się sposobem ułożenia pasm, nawojów o najlepszej *strukturze*. Do osiągnięcia tego celu postanowiono wykonać badania doświadczalne kompozytowych elementów ES różniących się sposobem rozmieszczenia pasm rowingu. Badania obejmowały:

- obserwacje powstawania i rozwoju uszkodzeń w materiale,
- pomiar odkształceń i przemieszczeń powierzchni badanego elementu,
- wyznaczenie wielkości sił niszczących.

Na podstawie wyników badań określono własności wytrzymałościowe struktur nawijanych. Wskazano nawoje o optymalnej strukturze ułożenia pasm rowingu w ściance kompozytowego elementu rurowego. Przedstawiono wskazówki technologiczne, podano parametry nastaw nawijarek oraz zaproponowano narzędzie w postaci programu komputerowego w celu uzyskania poprawnej struktury elementu nawijanego.

Rozdział 2

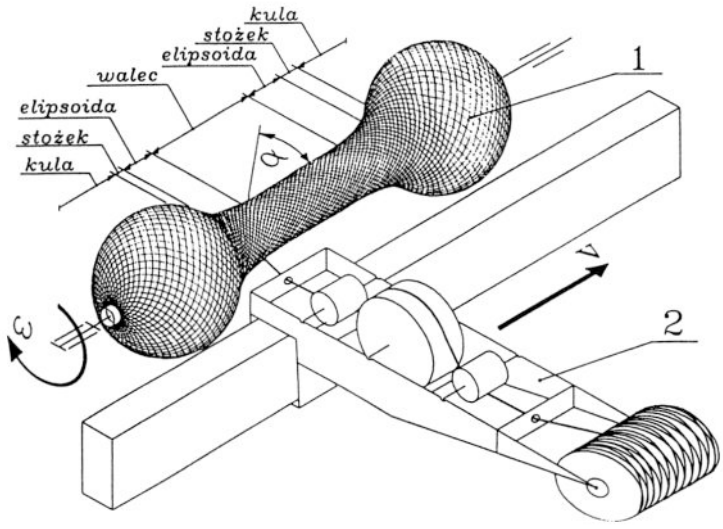
Opis geometryczny nawijania włókna

W niniejszym rozdziale przedstawiono tablicową metodę analizy nawijania. Metoda tablicowa w prosty sposób podaje wszystkie możliwe do zrealizowania sposoby nawijania włókna, przy założeniu uzyskania regularnej sieci. Parametrami sterującymi są: współczynnik reszty skoku nawijania a oraz przyjęta liczba naturalna n podziału obwodu πd elementu nawijanego. Podział ten związany jest z szerokością e wiązki nawijanej (np. rowing szklany), tworzącej regularną sieć. Pokazano przykłady wyznaczania nawojów dla wybranych parametrów. Przykłady te zobrazowano szczegółowymi rysunkami. Wykonano także program komputerowy do rysowania tablic nawojów, który na podstawie wybranego wiersza tablicy wykreśla nawój.

2.1 Wprowadzenie i przegląd literatury

Jednym z wielu sposobów wykonywania elementów kompozytowych z nośnikiem ciągłym jest nawijanie włókna, na przykład w postaci rowingu szklanego. Przesycony lepiszczem rowing (nośnik) nawija się na rdzeń w sposób uporządkowany, gwarantujący równomierne rozmieszczenie [65, 72, 73, 97], to znaczy w każdym przekroju poprzecznym nawiniętej bryły odstęp między włóknami (wiązkami) jest stały. Maszyna nawijająca jest podobna do tokarki (rys. 2.1). Rdzeń obraca się ze stałą prędkością kątową $\omega = const$, natomiast suport wykonuje ruch posuwistozwrotny z prędkością v. W przypadku nawijania pasma na rdzeniu z rys. 2.1, który jest bryłą złożoną (kula + stożek + elipsa + walec + ...) tak, że rozmieszczenie pasma jest równomierne, prędkość liniową ruchu suportu v ogólnie określono wzorem: $v = dl/dt$, gdzie l jest drogą przebytą przez suport w czasie t. W przypadku kiedy średnica rdzenia nie jest stała (rdzeń nie jest walcem), prędkość ruchu suportu również nie będzie stała. Sposób nawijania bryły złożonej przedstawiono w [6]. Optymalna prędkość nawijania włókna wynikająca z występujących procesów fizyko-chemicznych wynosi $91.4 \div 106.7 m/min$ [73]. W punkcie 2.2.2, strona 22 (pt. „Opis metody tablicowej") przedstawiono przypadek nawijania rury na rdzeniu walcowym o jednakowej grubości ścianki (część walcowa na rys. 2.1) oraz w punkcie 2.3.1, strona 28 pt. „Nawijanie butli" – na bryle złożonej z walca zakończonego dennicami. Metodą nawijania można wykonać również bryły nieobrotowosymetryczne, torus (patrz załącznik do pracy) i wiele innych.

Dotychczas ukazało się wiele opracowań dotyczących procesu nawijania, przy czym



Rysunek 2.1: Schemat procesu nawijania 1 – rdzeń z nawijanym elementem kompozytowym, 2 – suport z mechanizmem nasycającym.

nie podano prostej metody projektowania i kontroli nawijania. Opracowanie [76] jest niejednoznaczne dla wszystkich przypadków nawijania włókna ciągłego oraz mało przydatne do zastosowań praktycznych. Przedstawiona tam analiza nawijania nie obejmuje nawojów, których współczynnik reszty skoku nawijania a przyjmuje wartość z przedziału $a \in (0.5\ ,\ 1)$. Ponadto autor pracy [76] do opisania nawoju potrzebuje czterech parametrów (a, c, m oraz x). W [89] czysto teoretycznie opisano proces, w sposób nieprzydatny do zastosowań praktycznych. Wprowadzono zbyt wiele parametrów, a sposób ich definiowania jest mało precyzyjny. Ponadto opracowanie [89] (w przeciwieństwie do [76]) jest bardzo skąpe w graficzne przedstawienie wprowadzanych parametrów. W [7] zaproponowano inny sposób analizy nawoju będącego przedstawicielem np. grupy (1, 10, 12, 21) z tablicy 11 (wyjaśnienie w punkcie 2.2.3, strona 24) i wykorzystania w przemyśle tekstylnym jako sposób nawijania nici. Nawoje z grupy (1, 10, 12, 21) są łatwe do wykonania, ponieważ tolerancja ułożenia wiązki może być znacznie większa niż w pozostałych nawojach. Prawdopodobnie z tego powodu wiele firm produkujących kompozytowe elementy nawijane wykonuje swoje wyroby z tymi nawojami. Można to zaobserwować na zdjęciach reklamowych wyrobów nawijanych. W opracowaniu [6] przedstawiono sposób nawijania bryły złożonej, jednak autorzy również nie zwracają uwagi na różnorodność nawojów. Natomiast przedstawiony przypadek dotyczy nawoju oznaczanego w niniejszej pracy jako N_r1 (patrz punkt 2.2.2, strona 22 oraz rys. 2.7, strona 26). W opracowaniu [105] zwraca się uwagę na możliwość rozwarstwiania kompozytowych zbiorników nawijanych, wykonanych według nawoju N_r1. Delaminacja powstaje w wyniku braku przeplotów w nawiniętym kompozycie. Dalsze przykłady prac dotyczących analizy nawijania włókna ciągłego wymieniono we wstępie.

Wyniki badań własnych autora i przedstawione w [14÷19] oraz w rozdziale 4 dowodzą, iż inne sposoby ułożenia pasm nawijanych elementów kompozytowych mogą prowadzić nawet do 40% różnic w wytrzymałości, np. na skręcanie. Praca [76], którą wcześniej omówiono, była materiałem wyjściowym do opracowania metody tablicowej, którą przedstawiono poniżej. Metoda tablicowa jest innym sposobem analizy nawijania w oparciu o proste zasady graficzno-analityczne. W tej metodzie dowolny nawój opisują jedynie dwie liczby.

2.2 Główne zasady metody tablicowej

2.2.1 Charakterystyka parametrów nawijania

Poniżej przedstawiono analizę procesu nawijania prostego walca, lecz pominięto następujące zjawiska występujące w trakcie trwania procesu:

- powiększanie się średnicy rdzenia,
- bezwładność pasma rowingowego,
- zsuwanie się pasma (zwłaszcza na nawrotach).

Najważniejszym parametrem mechanicznym jest kąt nawijania α związany z późniejszym obciążaniem elementu, tzn. skręcaniem, ściskaniem itp. Wielkość kąta wyznacza się z następujących zależności wyprowadzonych w [65, 72, 73]:

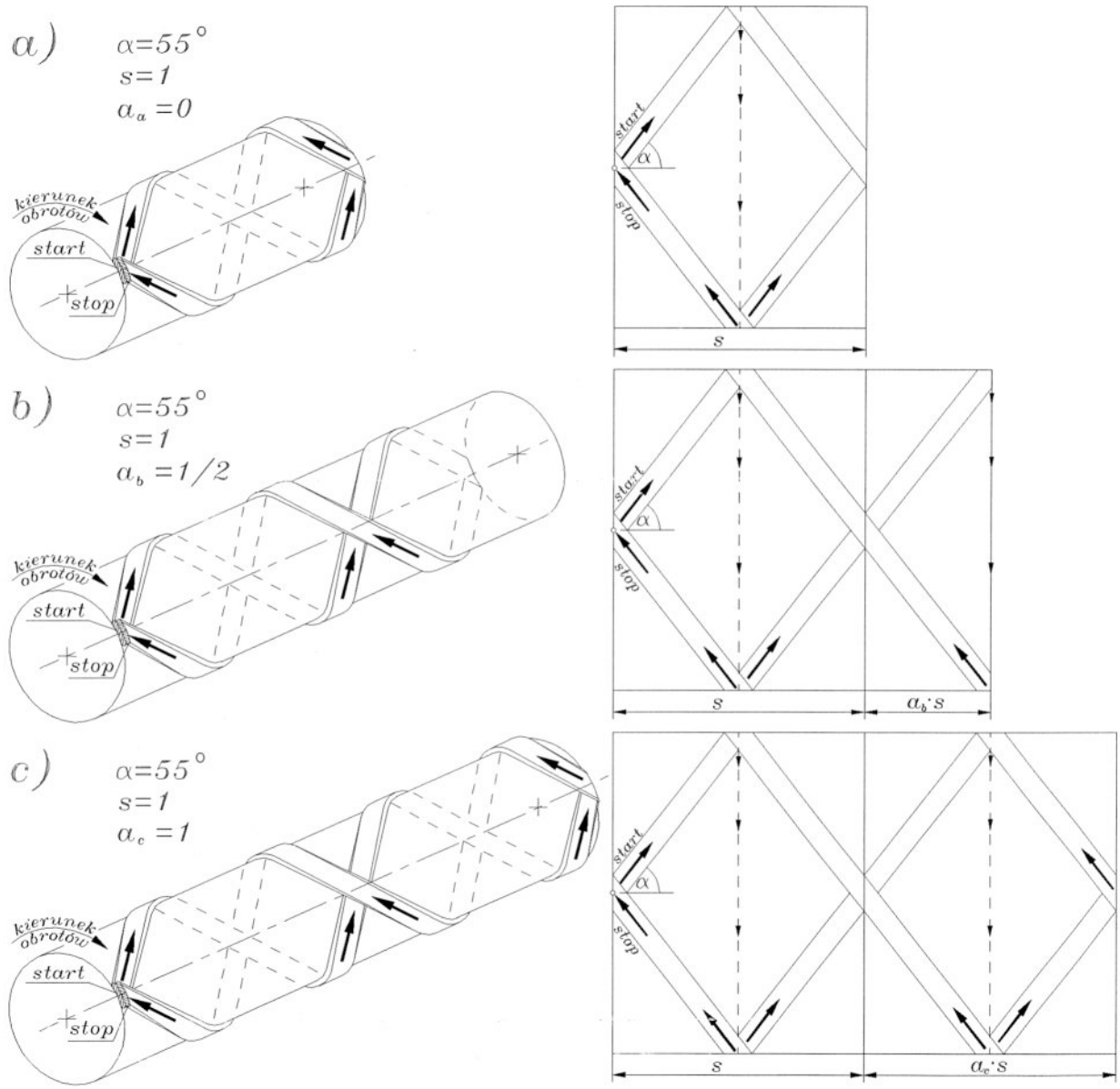
$$\begin{cases} \sigma_o = \sigma_f \cdot \sin^2 \alpha \\ \sigma_w = \sigma_f \cdot \cos^2 \alpha \end{cases} \tag{2.1}$$

lub

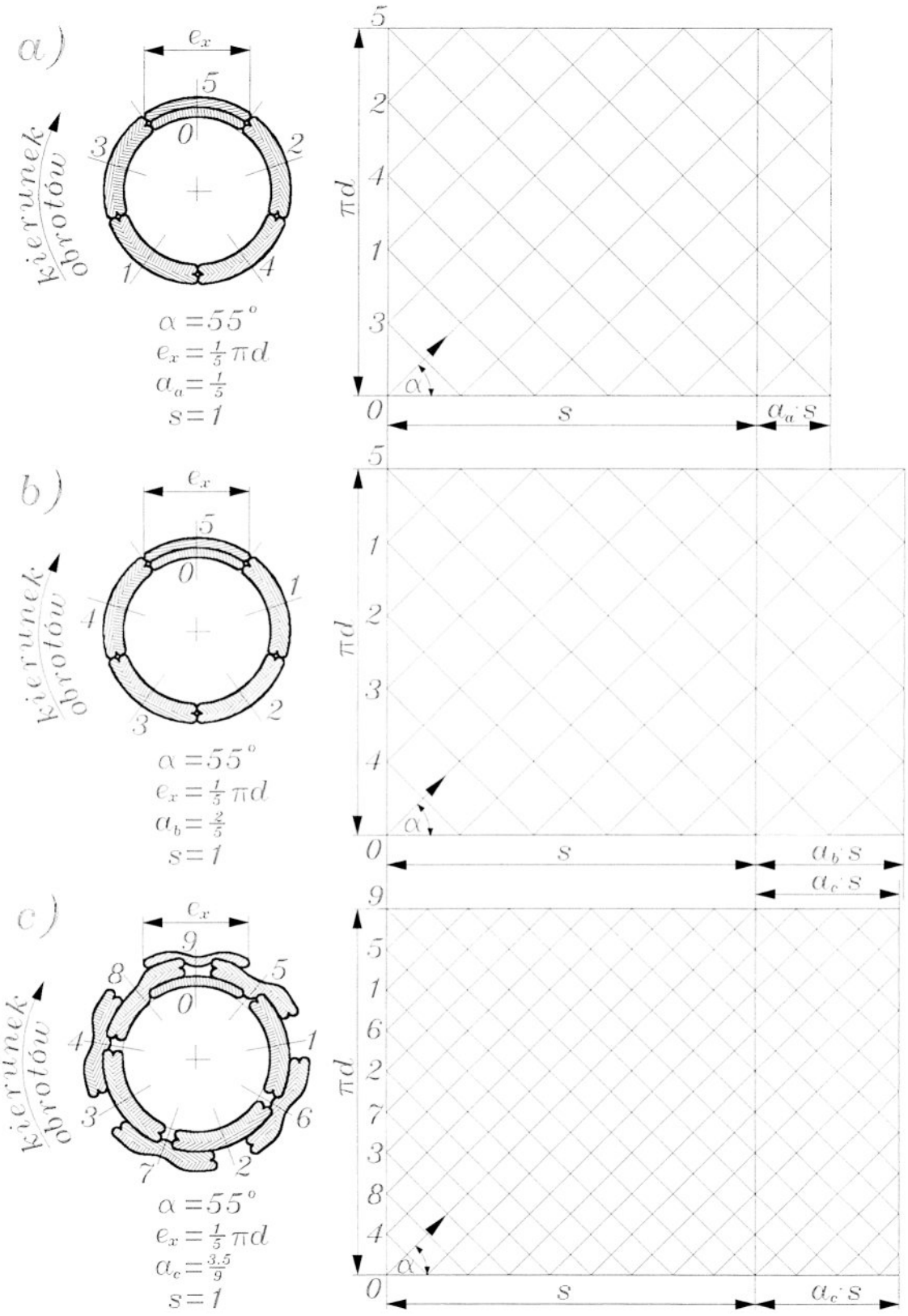
$$\frac{\sigma_o}{\sigma_w} = \tan^2 \alpha. \tag{2.2}$$

Innym, dokładniejszym sposobem wyznaczania kąta nawijania jest sporządzenie wykresu pętli naprężeń [37, 118]. Przyjęto, że analizowany element rurowy będzie zaślepiony na końcach i będzie pracował jako butla ciśnieniowa. Dla tego przypadku kąt nawijania wynosi $\alpha \approx 55°$, gdyż $\frac{\sigma_o}{\sigma_w} = 2$. Wiele prac [37, 118] krytycznie odnosi się do tak wyznaczonej wartości kąta nawijania, przyjmiemy ją tu jednak, ponieważ nieznacznie odbiega od wartości kąta wyznaczonej innymi metodami. Z kąta nawijania α oraz średnicy rdzenia d wyznaczono następujące parametry: skok nawijania s, drogę jaką przebędzie suport przy pełnym obrocie rdzenia oraz współczynnik reszty skoku nawijania a, który wybrano z przedziału $a \in (0, 1)$. Jeśli nawój pokrył równomiernie rdzeń, to znaczy tak, że przy zadanej szerokości nawijanej wiązki, np. rowingu szklanego powstała sieć, w której pasma równoległe stykają się ze sobą i w każdym punkcie na powierzchni rdzenia znajdują się one tylko dwa (górne i dolne, zorientowane w prawo i w lewo tzn. jedno pod kątem α, a drugie pod kątem $180° - \alpha$) to została nawinięta *warstwa*. W laminatach wykonanych metodą nawijania nie ma wyraźnej granicy pomiędzy *warstwami*, tak jak w laminatach z płótna, np. szklanego. Wynika to z indywidualnego układania pasm, np. rowingu szklanego, a używane pojęcie *warstwy* w przypadku laminatów nawijanych jest umowne [16]. Z punktu widzenia matematyki nawój jest przykładem tzw. geometrii skończonej wchodzącej w zakres teorii parkietażu [68].

Na rys. 2.2 przedstawiono szczególne przypadki nawojów różniące się między sobą współczynnikami reszty skoku nawijania: $a_a = 0$, $a_b = 0.5$ oraz $a_c = 1$. Są one wykorzystywane przy nawijaniu pod dużym kątem ($\alpha \approx 90°$) i wówczas skok $s = e$, gdzie e jest szerokością wiązki. Przykładem takiego nawoju może być bęben wciągarki z nawiniętą obwodowo liną stalową. Takie nawoje nie posiadają przeplotów – skok s jest równy szerokości wiązki e. Nawoje z rys. 2.2 i rys. 2.3 różnią się między sobą jedynie współczynnikami reszty skoku nawijania a. Jeśli przyjmiemy, że nawijanie odbywa się wiązką rowingu szklanego o szerokości w przekroju poprzecznym rdzenia $e_x = \frac{1}{5}\pi d$ (rys. 2.4) to nawoje z rys. 2.3a i rys. 2.3b spełnią warunek równomiernego rozmieszczenia w jednej *warstwie*.



Rysunek 2.2: Szczególne przypadki nawojów. Po lewej stronie widoki aksonometryczne nawojów oraz po prawej ich rozwinięcia. W przedstawionych przypadkach takie same są: średnica rdzenia d, skok nawijania s i kąt nawijania α. Różne są jedynie współczynniki reszty skoku nawijania a: $a_a = 0$, $a_b = 0.5$ oraz $a_c = 1$.



Rysunek 2.3: Rzuty czołowe nawojów oraz ich rozwinięcia. Przedstawione przypadki mają taką samą: średnicę rdzenia d, skok nawijania s, kąt nawijania α, i szerokość wiązki e. Różnią się jedynie współczynnikami reszty skoku nawijania a. a) $a_a = 1/5$. b) $a_b = 2/5$. c) $a_c = 3.5/9$.

Zmiana współczynnika reszty skoku nawijania na a_c nawoju z rys. 2.3c doprowadziła do nierównomiernego ułożenie wiązek. W tym przypadku powyższy warunek równomiernego rozmieszczenia przy szerokości wiązki $e_x = \frac{1}{5}\pi d$ nie jest spełniony. Nawoje z rys. 2.3a i rys. 2.3b na pierwszy rzut oka są takie same, jednak w rzeczywistości jest między nimi różnica jakościowa związana z kolejnością nakładania wiązek, to znaczy z tym, która wiązka leży przy rdzeniu (pod spodem), a która „na wierzchu". Powyższy efekt nazywany jest przeplotem. W następnym punkcie (2.2.2) przedstawiono sposób zestawiania wszystkich możliwych nawojów spełniających warunek równomiernego rozmieszczenia w jednej *warstwie*, przy stałej szerokości wiązki i możliwych do osiągnięcia przeplotach.

Reasumując – parametry nawijania to:

α – kąt nawijania (np. dla części walcowych butli ciśnieniowych $\alpha = 55°$),
s – skok nawijania: $s = \pi d/\mathrm{tg}\,\alpha$,
a – współczynnik reszty skoku nawijania – wybrany z przedziału $a \in (0\ ,\ 1)$.

2.2.2 Opis metody tablicowej

Dla projektującego element kompozytowy, który można wykonać metodą nawijania, np. rowingu szklanego na rdzeń, przydatne będzie usystematyzowanie nawojów po to, aby dla konkretnych wymiarów i obciążeń projektowanego elementu można dobrać nawój optymalny. Dla jasności metody przeanalizowano następujący przykład: należy wykonać metodą nawijania element rurowy o skończonej długości, który po zaślepieniu końców będzie obciążony ciśnieniem wewnętrznym.

Dane:

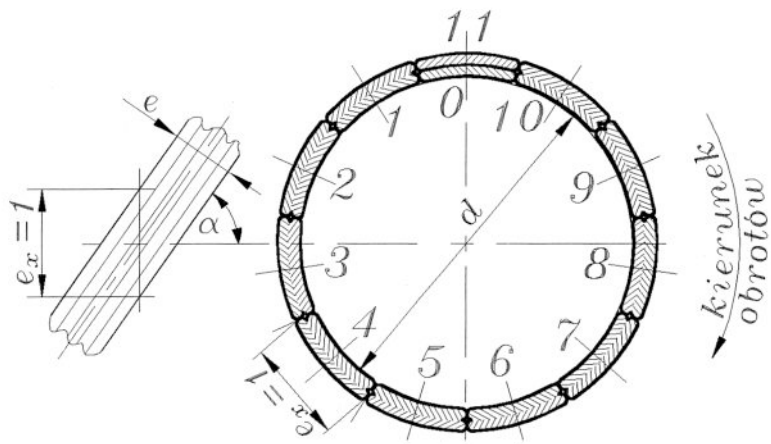
- obwód $\pi d = 11$,
- kąt nawijania $\alpha = 55°$,
- szerokość pasma e_x w przekroju poprzecznym rdzenia (rys. 2.4): $e_x = e/\cos\alpha = 1$.

Rdzeń w całości ma być pokryty równomierną *warstwą* przesyconych lepiszczem wiązek tak, aby został spełniony warunek nawoju składającego się z *warstwy*. Liczba pełnych faz ruchu suportu jest równa: $\pi d/e_x = 11$. Równomierne rozmieszczenie wiązek zrealizowano jedenastoma fazami przechodzenia suportu (22 nawroty z prawej i lewej strony nawijarki), tak jak to przedstawiono w rzucie osiowym rdzenia na rys. 2.4. Wszystkie możliwe przypadki nawojów zgrupowano w tablicy przedstawionej na rys. 2.5. W tablicy tej występują:

- kolejny numer nawoju N_r,
- obwód rdzenia πd, zapisany w postaci liczb będących kolejnymi numerami wiązek nawijanych na rdzeń – przy wstawianiu kolejnych numerów wiązek (od 0 do 11) posłużono się zasadą: „na przekątnej jedynka", a następnie wpisywano kolejne liczby w odstępach takich jakie powstały między zerem i jedynką,
- współczynnik reszty skoku nawijania a wyznaczono z następującej zależności:

$$a = \frac{N_r}{Z} = \frac{N_r}{22}, \tag{2.3}$$

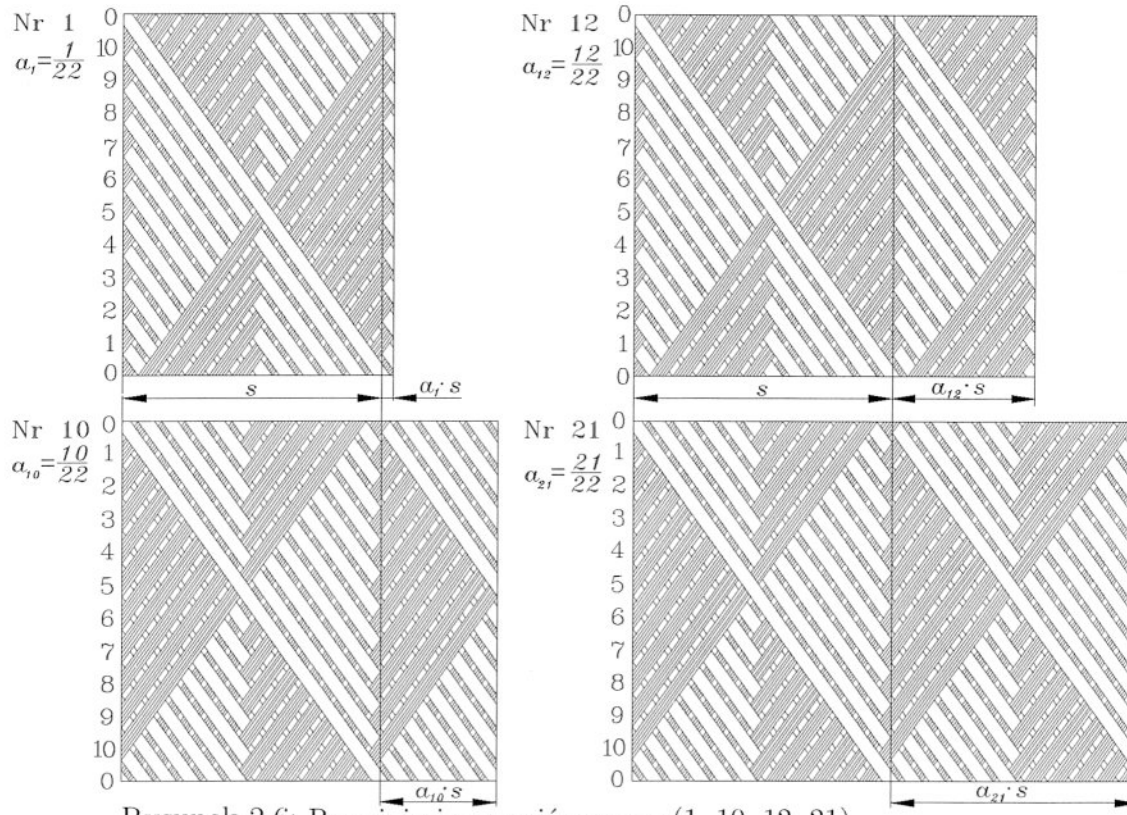
gdzie: Z — liczba przejść lub liczba nawrotów suportu (nawroty z prawej i lewej strony nawijarki). W omawianym przykładzie suport wykona 22 nawroty. Liczbę nawrotów suportu można również wyznaczyć z zależności: $Z = 2 \cdot n = 2 \cdot 11 = 22$, gdzie n to największy



Rysunek 2.4: Rdzeń z jedenastoma wiązkami włókien (przesycone pasma rowingu szklanego) rozmieszczonymi równomiernie na obwodzie oraz widok pojedynczej wiązki o szerokości e i e_x w płaszczyźnie przekroju prostopadłego do osi rdzenia. Wiązka nawinięta pod kątem $\alpha = 55°$, nawój z grupy (1, 10, 12, 21).

Nr	πd	a
0	0 – – – – – – – – – – 1	*0*
1	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	*1/22*
2	0 6 1 7 2 8 3 9 4 10 5 11	*2/22*
3	0 4 8 1 5 9 2 6 10 3 7 11	*3/22*
4	0 3 6 9 1 4 7 10 2 5 8 11	*4/22*
5	0 9 7 5 3 1 10 8 6 4 2 11	*5/22*
6	0 2 4 6 8 10 1 3 5 7 9 11	*6/22*
7	0 8 5 2 10 7 4 1 9 6 3 11	*7/22*
8	0 7 3 10 6 2 9 5 1 8 4 11	*8/22*
9	0 5 10 4 9 3 8 2 7 1 6 11	*9/22*
10	0 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 11	*10/22*
11	0 – – – – – – – – – – 1	*11/22*
12	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	*12/22*
13	0 6 1 7 2 8 3 9 4 10 5 11	*13/22*
14	0 4 8 1 5 9 2 6 10 3 7 11	*14/22*
15	0 3 6 9 1 4 7 10 2 5 8 11	*15/22*
16	0 9 7 5 3 1 10 8 6 4 2 11	*16/22*
17	0 2 4 6 8 10 1 3 5 7 9 11	*17/22*
18	0 8 5 2 10 7 4 1 9 6 3 11	*18/22*
19	0 7 3 10 6 2 9 5 1 8 4 11	*19/22*
20	0 5 10 4 9 3 8 2 7 1 6 11	*20/22*
21	0 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 11	*21/22*
22	0 – – – – – – – – – – 1	*22/22*

Rysunek 2.5: Tablica nawojów dla jedenastu przejść suportu. Pogrubiony druk to widok tablicy po uproszczeniu ($a \in (0, 0.25)$). Budując tablicę kierowano się zasadami: „na przekątnej jedynka" i „odległość $0 \longleftrightarrow 1$ jest krokiem w wierszu".



Rysunek 2.6: Rozwinięcia nawojów grupy (1, 10, 12, 21).

numer wiązki w *warstwie* (czyli ostatni). Bardziej ogólnie — n jest liczbą podziału obwodu rdzenia ($\pi d/e_x \approx n = 11, n \in N$).

2.2.3 Dyskusja wyników

- W metodzie tablicowej dowolny nawój opisują jedynie dwie liczby np. 11/4 (wielkość tablicy / numer wiersza). Projektujący element nawijany korzysta z tablicy, w której wybiera nawój oraz opisujące go wielkości, takie jak współczynnik reszty skoku nawijania a i numer nawoju N_r.

- Ze względu na współczynnik reszty skoku nawijania a rozróżnia się w tablicy cztery przedziały podobieństwa nawojów:

  1) $a \in (0\ ,\ 0.25)$
  2) $a \in (0.25\ ,\ 0.5)$
  3) $a \in (0.5\ ,\ 0.75)$
  4) $a \in (0.75\ ,\ 1)$

  Podział na przedziały jest widoczny w kolumnie obwodu rdzenia πd. Nawój $N_r 1$ jest w efekcie końcowym taki sam jak 10, 12 i 21, o czym świadczy kolejność liczb w wierszu (rys. 2.5). Różnica jedynie jest taka, że nawoje 10 i 21 mają zwrot kierunku

narastania kolejnych numerów wiązek na obwodzie przeciwny do kierunku obracania się rdzenia (rys. 2.6). Natomiast nawoje 1 i 12 mają kierunki narastania kolejnych numerów wiązek na obwodzie zgodne z kierunkami obracania się rdzenia.

- Analogiczne podobieństwa odnoszą się do następujących grup nawojów: (2, 9, 13, 20), (3, 8, 14, 19), (4, 7, 15, 18) i (5, 6, 16, 17).

- Nawoje 0, 11 i 22 są przypadkami szczególnymi – występują one w każdej tablicy nawojów niezależnie od przyjętej liczby podziału obwodu rdzenia ($\pi d/e_x \approx n = 11, n \in N$). Zostały one przedstawione na rys. 2.2, strona 20.

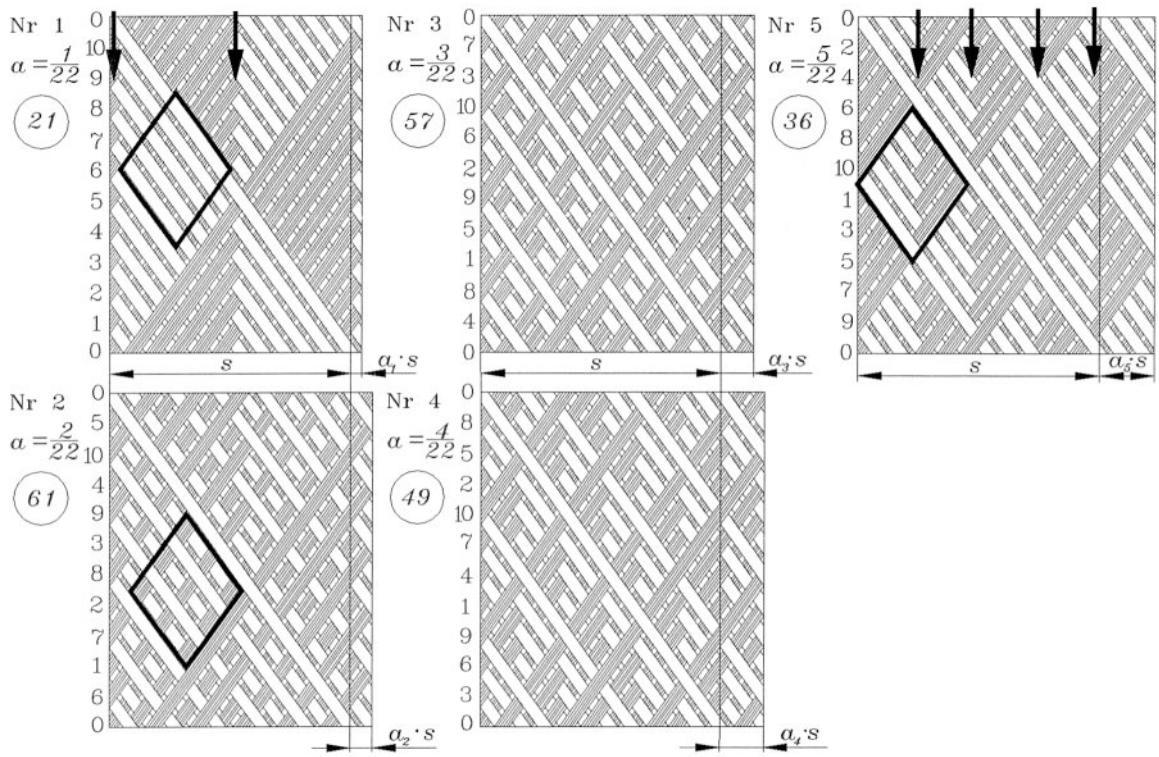
- Nawój 11 jest osią symetrii tablicy (rys. 2.5) i dzieli ją na pół w miejscu gdzie $a = 0.5$.

- Powyższe podobieństwa nawojów pozwalają na uproszczenie tablicy, to znaczy zapisania tylko wierszy spełniających warunek $a \in (0, 0.25)$, co zaznaczono pogrubionym drukiem na rys. 2.5.

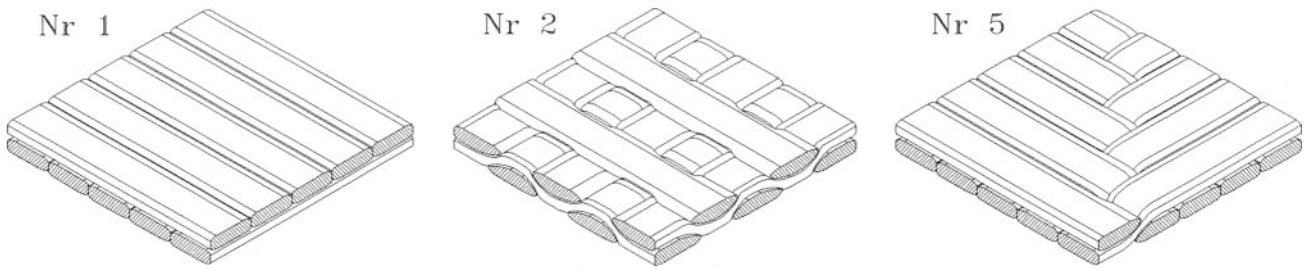
- Reszty skoków nawijania nawojów N_r10, N_r12 i N_r21 są odpowiednio dłuższe od N_r1: $s \cdot (a_{10} - a_1)[mm]$, $s \cdot (a_{12} - a_1)[mm]$ i $s \cdot (a_{21} - a_1)[mm]$ (rys. 2.6). Podobnie jest z innymi grupami nawojów.

- Z nawojów od 1 do 5 należy wybrać najlepszy, charakteryzujący się dobrym rozmieszczeniem przeplotów. Inaczej: charakteryzujący się optymalną długością wiązki zawartej pomiędzy przeplotami. Oceny jakościowej można dokonać wzrokowo lub określić liczbę wiązek odkrytych. Na rys. 2.7 przedstawiono nawoje od 1 do 5, na których można dopatrzeć się różnicy w strukturze jaka istnieje między nimi. Na rys. 2.8 pokazano widoki aksonometryczne wycinków wybranych nawojów zaznaczonych ramką na rys. 2.7. W przypadku zliczania można się ograniczyć do pasm niezakreskowanych na rozwinięciach z rys. 2.7, w przedziale od 0 do s, czyli zlicza się białe pola pamiętając, że jest to rozwinięcie walca i wiązki odcięte w części górnej mają swoją ciągłość w części dolnej. W załączniku do pracy zamieszczono tablice nawojów do wartości $n = 53$ oraz rysunki wszystkich nawojów dla $\alpha = 45°$.

- Nawój N_r1 ma bardzo niekorzystne rozmieszczenie przeplotów oraz bardzo długie odcinki wiązek pomiędzy przeplotami (zliczono 21 wiązek). W przypadku zastosowania nawoju N_r1, np. w ciśnieniowym elemencie rurowym, w miejscach zaznaczonych strzałką na rys. 2.7 następuje załamanie włókien, co powoduje miejscowe odchylenie ich osi od kierunku występujących w elemencie naprężeń i może stanowić rodzaj karbu (dowodzą tego wyniki badań przedstawione w punkcie 4.2.2, strona 55). W miejscach między strzałkami nie ma przeplotu, co może być przyczyną występowania rozwarstwień elementu. W czasie obciążania, np. ciśnieniem wewnętrznym, na powierzchni rury wykonanej według nawoju N_r1 można zauważyć powstawanie pęknięć wzdłuż włókien na powierzchni pomiędzy strzałkami. Obszar wokół linii przeplotu nie ma pęknięć – rys. 4.7, strona 57. Jeśli pęknięcie pojawi się na linii przeplotu w wyniku powstania naprężeń krytycznych jest to początek zniszczenia rury. Zestawienie liczb przeplotów dla pięciu omawianych nawojów przedstawiono w tabeli 4.2, strona 64.



Rysunek 2.7: Rozwinięcia nawojów 1, 2, 3, 4 i 5. W okręgach zapisano liczby wiązek zliczonych.



Rysunek 2.8: Widoki aksonometryczne wycinków nawojów N_r1, 2 i 5, zaznaczonych ramkami w kształcie rombu na rys. 2.7.

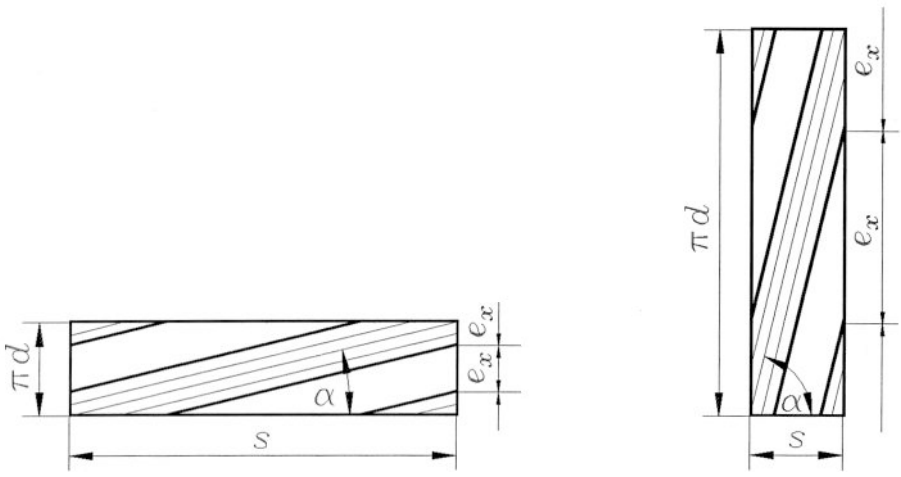
- Współpraca składników kompozytu pod obciążeniem (syciwo oraz przeplecione i sfalowane włókna w nawojach) komplikuje się z powodu tendencji do wyprostowywania się rozciąganych włókien wzdłużnych, występowania momentów skręcających oraz ścinania między wiązkami, co prowadzi do powstawania pęknięć [66]. Wytrzymałość kompozytu wykonanego techniką nawijania związana jest ze zdolnością powstawania i kumulowania pęknięć, natomiast zdolność ta zależy od średniej długości wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ (długość wiązki pomiędzy przeplotami). Wartości te dla omawianych przypadków przedstawiono w tabeli 4.2, strona 64.

- Widoki nawojów podobne są do widoku płótna, jednak struktury nawojów nie można porównywać ze strukturą płótna, np. szklanego. Właściwości laminatów wykonanych metodą nawijania różnią się od właściwości laminatów wykonanych przez nakładanie kolejnych warstw płótna. Różnice te wynikają z następujących aspektów:

  - W laminatach wykonanych metodą nawijania nie ma wyraźnej granicy pomiędzy *warstwami*, tak jak w laminatach z płótna, np. szklanego. Wynika to z indywidualnego układania pasm, np. rowingu szklanego, a używane pojęcie *warstwy* w przypadku laminatów nawijanych jest umowne i odnosi się do równomiernej sieci powstałej w wyniku nawinięcia wiązki. Taka sieć jest liczona od przyjętego punktu znajdującego się w osi wiązki wyjściowej do punktu również znajdującego się w osi wiązki dokładnie pokrywającej wiązkę wyjściową. Dla wielu nawojów precyzyjny laminat wykonany metodą nawijania nie musi posiadać pełnej liczby *warstw* (liczba większa od 1) i nie ma to wpływu na jego wytrzymałość oraz wygląd zewnętrzny.
  - Elementarne włókno, np. szklane w płótnie szklanym, posiada większą liczbę wad od włókna użytego do nawijania (pęknięcia, wyszczerbienia, nieciągłości, preparacja włókiennicza i inne). Uszkodzenia takie powstają w czasie wykonywania płótna.
  - Przy nawijaniu wiązka układana jest z naciągiem, natomiast naciągowi wiązki w płótnie towarzyszy pewna dowolność zależna od sił wywieranych przez wiązki sąsiadujące.
  - Pewne kompozytowe elementy konstrukcyjne (takie jak kolanka rurociągów, trójniki, elementy stożkowe i wiele innych) można wykonać metodą nawijania jedną wiązką włókna ciągłego, natomiast nie można ich wykonać przy użyciu jednego kawałka płótna. Taki element w przypadku płótna wykonuje się z wielu kawałków i wtedy użyte włókno jest nieciągłe.

  Wymienione aspekty wskazują, iż właściwości (mechaniczne, elektryczne i inne) elementów nawijanych wiązką włókna ciągłego są wyższe od wykonanych z płótna. Wyżej wymienione właściwości można przenieść również na inne bryły, takie jak: kula, stożek, torus i inne. W załączniku zamieszczono przykładowe rysunki nawijania kuli i torusa.

- Metodę tablicową można stosować gdy spełniony jest warunek: $\pi d \geq 2e_x$. Odpowiada on przedziałowi kątów nawijania: $0° < \arctan\frac{2e_x}{s} < 90°$. Te dwa skrajne przypadki zobrazowano na rys. 2.9.



Rysunek 2.9: Dwa skrajne przypadki nawijania wiązek włókna ze względu na kąt nawijania α.

2.3 Przykłady zastosowań metody tablicowej

2.3.1 Nawijanie butli

Płaszcz nośny butli ciśnieniowych może być wykonany metodą nawijania. Spotykane butle mają kształt walca zaślepionego dennicami sferycznymi, torisferycznymi [81], elipsoidalnymi i innymi, powstałymi przez obrót krzywych tworzących. Przy projektowaniu nawoju dla butli kompozytowych można również posłużyć się tablicą, podobnie jak przy nawijaniu kompozytowych elementów rurowych. W opisanej metodzie rodzaj krzywej tworzącej dennicę nie ma znaczenia. Ważny natomiast jest parametr przeskoku p, to znaczy długość łuku o promieniu $r = d/2$, którego początkiem jest punkt przejścia wiązki z powierzchni walcowej na dennicę, a końcem jest punkt przejścia z dennicy na powierzchnię walcową. Na rys. 2.10 przedstawiono graficzną ilustrację parametru p. Parametr przeskoku p jest liczbą całkowitą z przedziału od 0 do $\pi d/e_x$. Jest to iloraz rzeczywistej długości łuku i szerokości wiązki e_x:

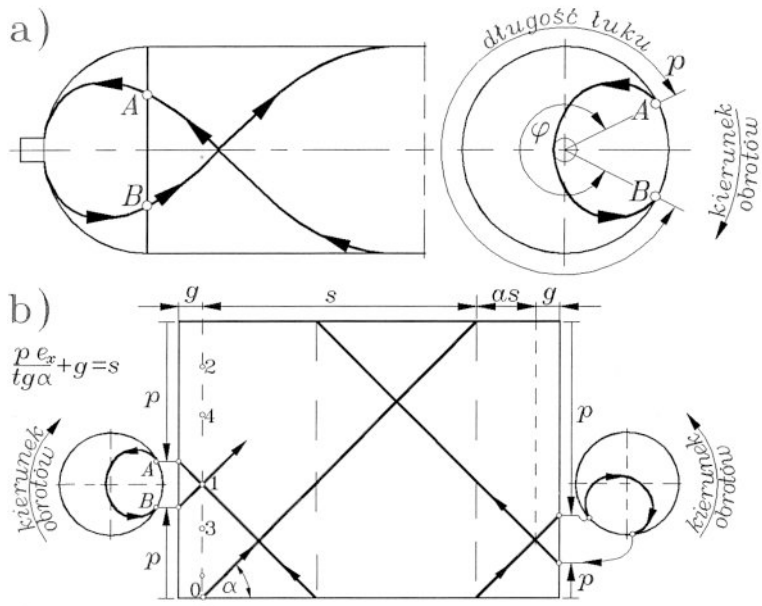
$$p = \frac{\pi d}{e_x} \cdot \frac{\phi}{2\pi} = \frac{d \cdot \phi}{2e_x} \tag{2.4}$$

Do przedstawienia metody nawijania butli posłużono się następującym przykładem:
Wykonać metodą nawijania kompozytową butlę ciśnieniową przedstawioną na rys. 2.11, z tolerancją długości części walcowej $T = 0.5cm$.

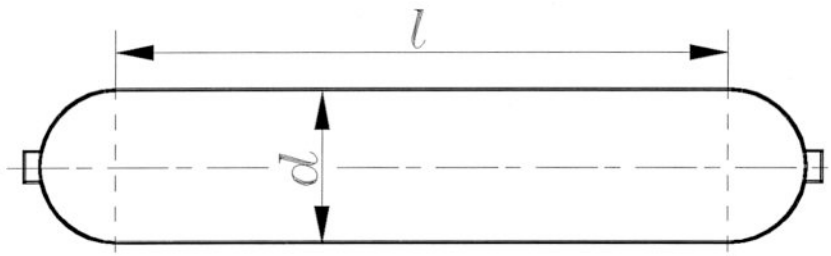
Dane:

- Obwód $\pi d = 11cm$, gdzie: d – średnica butli.
- Kąt nawijania $\alpha = 55°$.
- Długość części walcowej $l^T = s(k + a) = 15^{\pm 0.5}cm$,
  gdzie: s – skok nawijania $s = \pi d / \operatorname{tg} \alpha = 7.70cm$,
  k – liczba naturalna $k \in N$, określa ona liczbę skoków $k = 1$,
  a – współczynnik reszty skoku nawijania (wybrany z tabeli nawojów).
- Szerokość pasma w przekroju poprzecznym butli:

$$e_x = \frac{e}{\cos \alpha} = 1cm, \tag{2.5}$$



Rysunek 2.10: Fragment nawoju dla butli z pomiarem długości łuku p: a) – rzuty, osiowy i czołowy dennicy butli, b) – rozwinięcie powierzchni walcowej z rzutami dennic.



Rysunek 2.11: Kompozytowa butla ciśnieniowa.

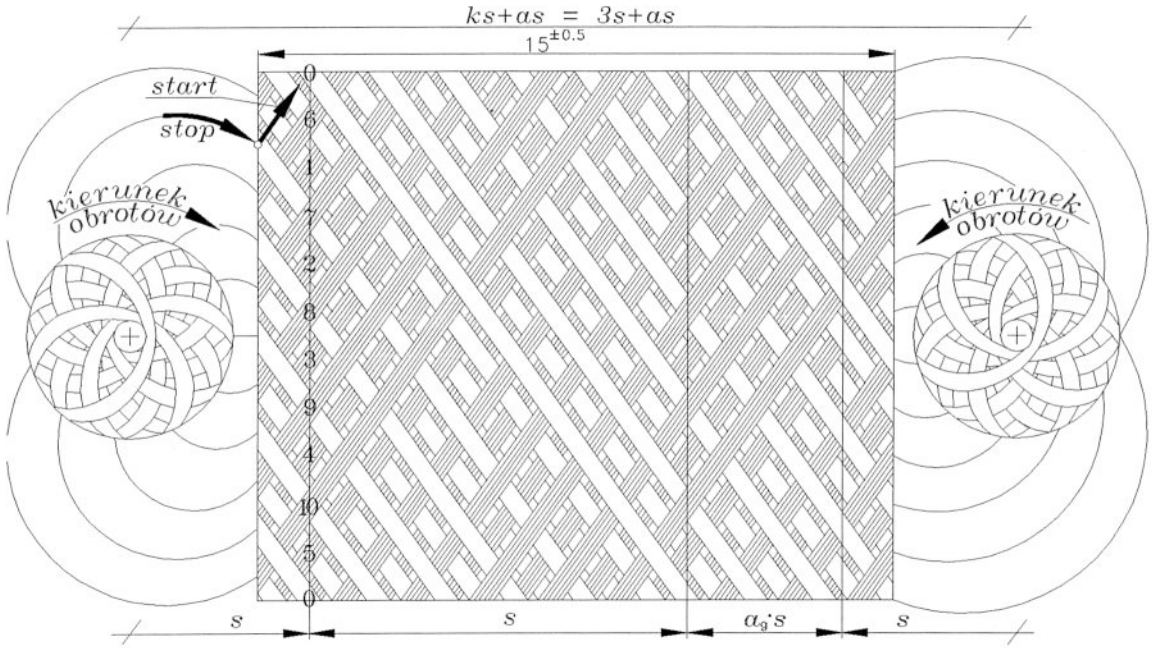
gdzie: e – szerokość pasma (rys. 2.4, strona 23),

- Parametr przeskoku wiązki p określono doświadczalnie. Dla rozpatrywanej dennicy sferycznej wynosi: $p = 8cm$.

Wymienione dane są takie jak w przykładzie omówionym wcześniej dla elementów rurowych. W związku z tym wykorzystano tablicę z rys. 2.5, strona 23. W celu zinterpretowania tej tablicy dla butli należy wyznaczyć teoretyczną długość butli $L = k' \cdot s + a \cdot s = 3 \cdot s + a \cdot s$ (k' — liczba skoków). Aby wyznaczyć a podzielono teoretyczną długość butli przez s. Po odjęciu od wyniku części całkowitej ($k' = 3$) otrzymano współczynnik reszty skoku nawijania a:

$$\frac{L}{s} = \frac{26.2}{7.7} = 3.402 \Longrightarrow a = 0.402 \tag{2.6}$$

Na podstawie współczynnika a wybrano z tablicy nawojów nawój N_r9, dla którego $a_9 = 9/22 = 0.409$. Zgodnie z punktem pt. „Dyskusja wyników" nawój N_r9 jest analogią nawoju N_r2 (przedstawionego na rys. 2.7, strona 26), a ten z kolei charakteryzuje się największą



Rysunek 2.12: Rozwinięcie nawoju dobranego z tablicy dla butli kompozytowej.

liczbą przeplotów równomiernie rozmieszczonych oraz najkrótszą średnią długością wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$.

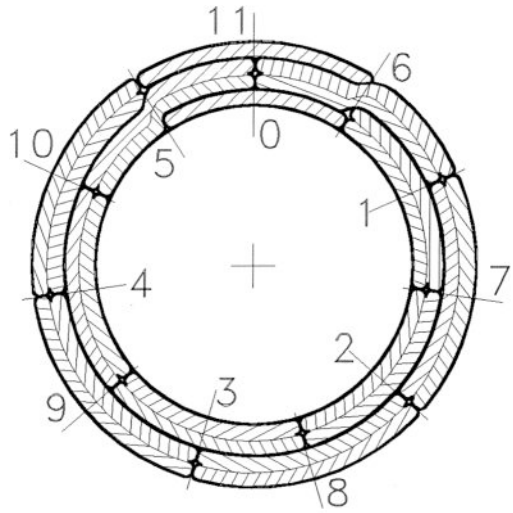
Do zakończenia zadania pozostaje sprawdzić czy długość butli mieści się w zadanej tolerancji. W tym celu należy przeprowadzić czynności odwrotne do wyznaczania współczynnika a, ale już z wartością odczytaną z tablicy dla nawoju N_r9 — a_9=9/22=0.409:

- zmodyfikowana długość teoretyczna butli jest równa:
  $L_9 = s \cdot (k' + a_9) = 7.7 \cdot (3 + 0.40909) = 26.25cm$,
- rzeczywista długość części walcowej wynosi:
  $l_9^{0.5} = L_9 - \frac{2 \cdot p \cdot e_x}{\operatorname{tg} \alpha} = 26.25 - 11.2 = 15.05cm$.

Wyznaczona rzeczywista długość części walcowej $l_9^{0.5}$ z powodzeniem mieści się w zadanej tolerancji $l^{0.5} = 15^{\pm 0.5}cm$. Na rys. 2.12 przedstawiono rozwinięcie nawoju dobranego z tablicy dla zadanych wymiarów butli kompozytowej. Nawój ten należy do grupy (2, 9, 13, 20) i został przedstawiony także na rys. 2.7, strona 26. Wydaje się, iż przedstawiony sposób nawijania butli pod kątem $\alpha \approx 55°$ jest teoretyczny, jednak wykonano butle według opisanej metody, a szczegółowe wyniki badań ciśnieniowych tych butli przedstawiono w punkcie 4.4, strona 81.

2.3.2 Wyznaczanie długości nawijanego elementu kompozytowego

Sposób wyznaczania długości nawojów dla butli przedstawiono w poprzednim punkcie (2.3.1). Dla nawijanego kompozytowego elementu rurowego odpowiednią długość wyznacza się dodając do wymaganej dwie długości obcinanych końcówek (w przypadku nawijarek z łańcuchowym posuwem suportu jest to około 75 mm dla rur o średnicy 100 mm



Rysunek 2.13: Struktura nawoju dwuwarstwowego (jedna *warstwa*) tzw. „muru ceglanego" w rzucie czołowym. Nawój 11/2, przedstawiciel grupy (2,9,13,20). Szerokość pasma $e'_x = 2e_x$.

nawiniętych pod kątem $\alpha = 45°$ – w wyniku zsuwania się wiązek miejscowo zwiększa się kąt nawijania, dlatego końce należy odciąć). Następnie powiększoną długość dzieli się przez skok nawijania s, natomiast wartość otrzymana po przecinku jest resztą skoku nawijania a, według której dobiera się nawój z tablicy uwzględniając przy tym rozłożenie przeplotów.

2.3.3 Nawoje dwuwarstwowe

Wytrzymałość nawijanego elementu kompozytowego można zwiększyć przez wybieranie nawojów składających się z dwóch *warstw*. Po nawinięciu jednej *warstwy* oś pasm drugiej układa się dokładnie na linii styku pasm *warstwy* pierwszej. Jeśli na tym nawoju zostanie nawinięty drugi taki sam, a na nim następny itd., to uzyskana struktura w przekroju promieniowym będzie przypominać mur z cegieł (rys. 2.13). Tablicę dla nawojów dwuwarstwowych wykonuje się tak samo jak dla jednowarstwowych. Wtedy szerokość pasma przyjmuje się dwa razy mniejszą — $e_x = e/2 \cdot \cos\alpha$. Warunek stosowalności metody tablicowej $\pi d \geq 2e_x$ przyjmie postać $\pi d \geq e\cos\alpha$.

Z tablicy wykonanej dla nawojów dwuwarstwowych należy wybrać nawoje o numerach parzystych w przedziale $a \in (0, 0.25)$. Analogiczne nawoje można również wybrać spoza tego przedziału, ale nie zawsze będą one miały numery parzyste. Przykład nawijania butli z punktu 2.3.1, a także nawoje grupy (2,9,13,20) oraz (4,7,15,18) z rys. 2.5, strona 23 są nawojami dwuwarstwowymi, pod warunkiem nawijania pasmem dwa razy szerszym. Na rys. 2.13 przedstawiono rzut czołowy nawojów grupy (2,9,13,20), ale jest on nawinięty pasmem o szerokości $e'_x = 2e_x$.

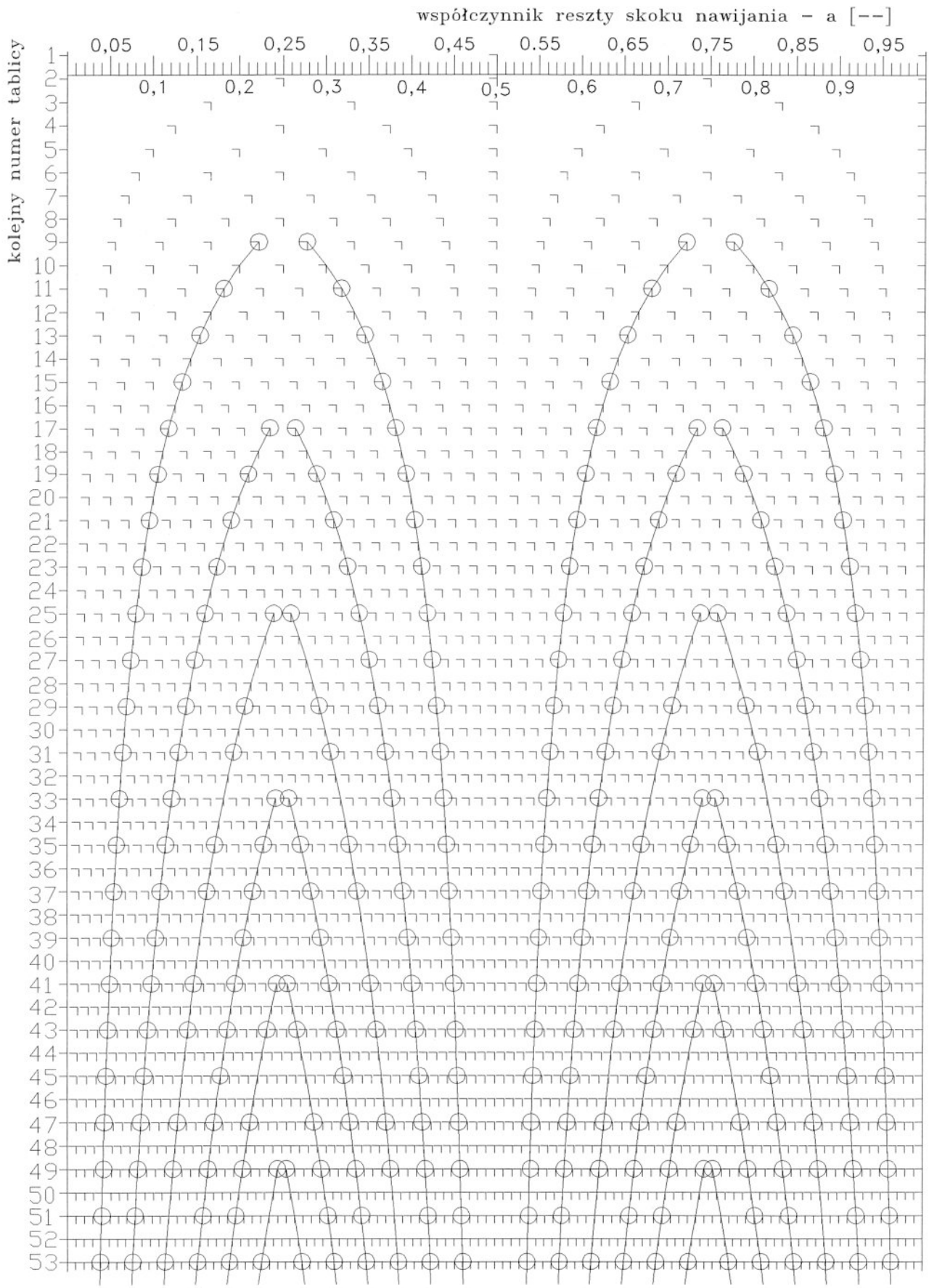
Na podobnych zasadach można wyznaczać nawoje o większej liczbie warstw, jednak nie mają one praktycznego znaczenia.

2.3.4 Ustawianie nawijarek łańcuchowych

Tablica nawojów może być przydatna przy ustawianiu nawijarek łańcuchowych na wybrany nawój. Została ona sprawdzona przy wykonywaniu rur oraz butli próbnych, opisanych w rozdziale 4. Poniżej przedstawiono graficzną metodę ustawiania nawijarek łańcuchowych, w oparciu o program komputerowy *AutoCAD*.

Ruch posuwisty suportu nawijarki (rys. 2.1, strona 18) nadawany jest poprzez łańcuch rolkowy, zawieszony na dwóch kołach zębatych. Jedno z tych kół jest kołem napędowym, natomiast drugie napinającym. Koło napędowe jest sprzężone z wrzecionem nawijarki poprzez zestaw kół zębatych. Suport przytwierdzony jest przegubowo do jednego z ogniw łańcucha. Kąt nawijania uzyskuje się przez odpowiedni dobór liczby zębów łańcuchowego koła napędowego oraz odpowiedni dobór przełożenia pomiędzy kołem łańcuchowym i wrzecionem nawijarki [75, 77, 78]. Kąt nawijania α wyznacza prędkość liniowa suportu v_l i prędkość obwodowa rdzenia nawijanego elementu rurowego v_o według zależności: $\alpha = arctg(v_o/v_l)$. Jeśli kąt nawijania α został prawidłowo dobrany należy wykonać graficzne zestawienie tablic nawojów, wykorzystując np. oprogramowanie komputerowe *AutoCAD* [90]. Zestawienie tablic nawojów przedstawiono na rys. 2.14. Oś pozioma jest skokiem nawijania z podziałem na reszty skoku nawijania a. Oś pionowa przedstawia kolejne tablice nawojów uszeregowane od 1 do 53. Punkty wyznaczone przez obróconą literę „L" (⅂) są nawojami. Rzut punktu na oś pionową wskazuje numer tablicy, natomiast rzut na oś poziomą wskazuje współczynnik reszty skoku nawijania a. Numer tablicy oraz współczynnik reszty skoku nawijania w pełni określają nawój (punkt 2.2.3, strona 24). Rysunki tablic od 2 do 53 oraz widoki nawojów przedstawiono w załączniku do niniejszej pracy.

Na nawijarce łańcuchowej wyboru nawoju dokonuje się poprzez odpowiedni dobór ogniw łańcucha. Liczbę ogniw dobiera się w zależności od długości rdzenia, natomiast przedział, z którego będą zdejmowane i zakładane ogniwa jest zależny od wymaganej długości elementu nawijanego. Po wykonaniu minimum trzech próbnych i różnych nawojów z możliwie dużego przedziału, należy nawoje te rozpoznać i odnaleźć na rys. 2.14. Następnie w przyjętej skali (oś pozioma to skok nawijania) nanosi się kolejne ogniwa łańcucha oraz łączy je linią prostą. Jeśli linia przecina się z rzutem nawoju rozpatrywanej tablicy to taki nawój jest możliwy do wykonania ze wskazaną liczbą ogniw. Przykład praktycznego zastosowania opisanej metody przy wykonywaniu rur próbnych dla rur skręcanych przedstawiono w punkcie 4.3.3, strona 62. Przy wykonywaniu rur ciśnieniowych oraz butli również wykorzystano powyższą metodę, jednak nie przedstawiono w niniejszej pracy.



Rysunek 2.14: Zestawienie tablic nawojów.

2.3.5 Określanie długości pasma

Tablica nawojów może być również przydatna do wyznaczenia długości pasma oraz ilości lepiszcza. Np. długość wiązki potrzebna do nawinięcia rury o długości $l_s = s$ jest równa:

$$l_s = \sqrt{s^2 + (\pi d)^2} \cdot 2 \cdot \frac{\pi d}{e_x}. \tag{2.7}$$

Wartość wyliczona z powyższej zależności jest stała dla tablicy przyporządkowanej konkretnym wymiarom. Wartością zmienną w poszczególnych wierszach jest długość l_{as} potrzebna do nawinięcia samej reszty skoku nawijania as. Długość pasma l_{as} można obliczyć z następującej zależności: $l_{as} = a_i \cdot l_s$, gdzie a_i — wartości współczynnika a w wierszu (nawoju). Aby obliczyć długość wiązki potrzebną do nawinięcia całego elementu trzeba l_s pomnożyć przez liczbę skoków i dodać l_{as}, czyli:

$$l_p = k \cdot l_s + a_i \cdot l_s = l_s(k + a_i), \tag{2.8}$$

gdzie k – liczba skoków nawijania s na długości kompozytowego elementu rurowego. Mając długość l_p można obliczyć jego masę, posługując się współczynnikiem tex. Z informacji, iż laminat epoksydowo-szklany dobrze wykonanego (przesyconego) kompozytowego elementu rurowego składa się z około 50% wagowych żywicy epoksydowej można obliczyć zawartość syciwa.

2.3.6 Program komputerowy do wyznaczania nawojów

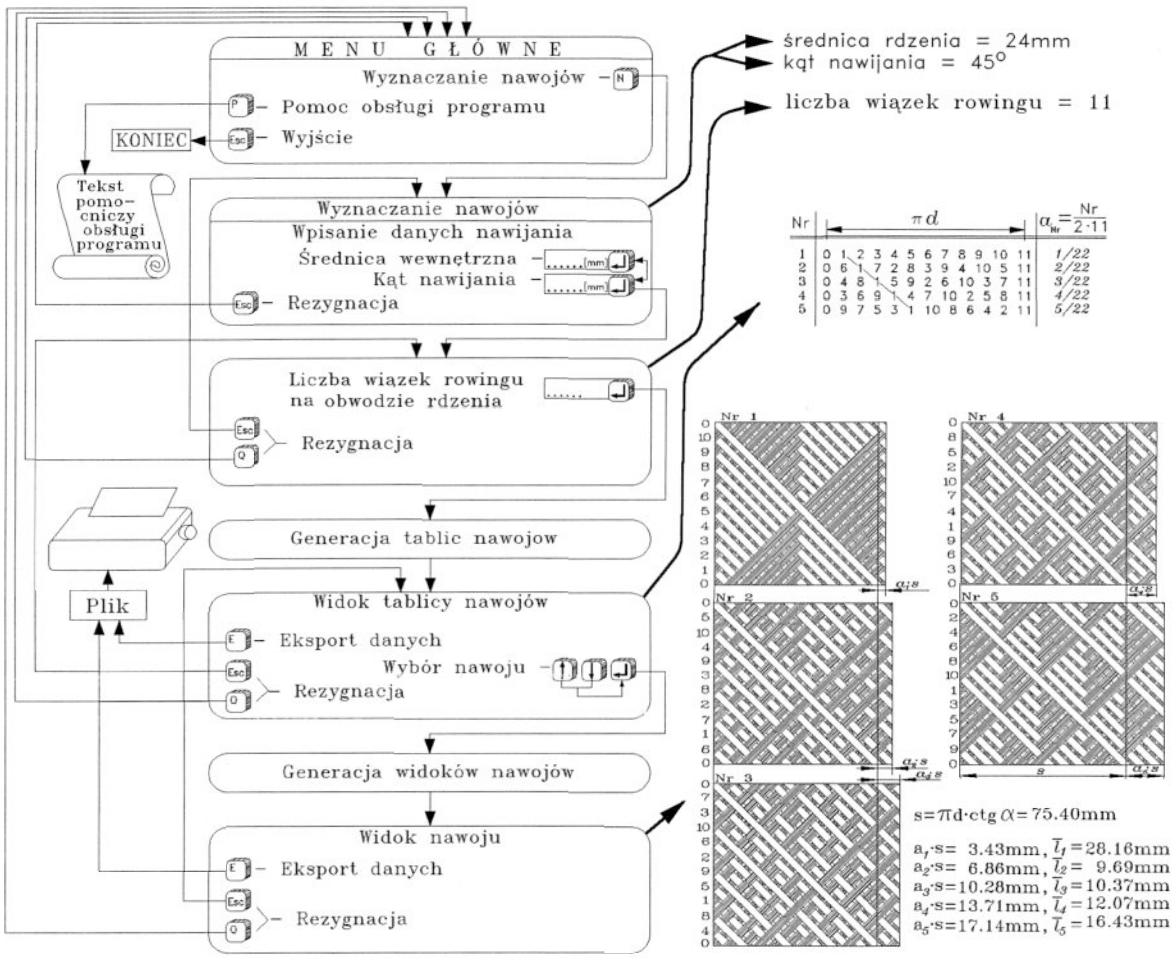
Projektującemu element kompozytowy, który można wykonać metodą nawijania, np. rowingu szklanego na rdzeń, przydatne będzie usystematyzowanie nawojów po to, aby konkretnym wymiarom i obciążeniom projektowanego elementu mógł dobrać nawój optymalny. Wyniki badań własnych przedstawione w rozdziale 4 dowodzą, iż różnice w strukturze nawijanych elementów kompozytowych mogą prowadzić nawet do 40% rozbieżności w wytrzymałości, np. na skręcanie. Jest to związane ze średnią długością wiązki nieprzeplecionej w nawoju $\bar{l}$.

W celu ułatwienia selekcji nawojów wykonano program komputerowy [23], według zasad przedstawionych w punkcie 2.2 strona 19. Program wykonano w języku *Turbo Pascal 7.0*, którego funkcjonalny schemat blokowy przedstawiono na rys. 2.15. Zadaniem programu jest wygenerowanie tablicy nawojów w sposób wyczerpujący dla danej liczby wiązek rowingu. W chwili obecnej istnieją opracowania dotyczące związków pomiędzy parametrami nawoju a wytrzymałością elementu jedynie dla skręcania, które wymagają sprawdzenia.

Po uruchomieniu programu należy podać następujące dane wejściowe:

- średnicę elementu rurowego — $d[mm]$,
- kąt nawijania — $\alpha[\ ^\circ]$,
- liczbę wiązek rowingu na obwodzie rdzenia — $n[-]$.

Po wprowadzeniu powyższych danych zostaje wyświetlona na monitorze tablica nawojów. Używając kursorów (góra – dół) można wybrać dowolny nawój z przedstawionej tablicy. Po potwierdzeniu na monitorze zostanie przedstawiony sposób powstawania wybranego nawoju według zadanych parametrów.



Rysunek 2.15: Funkcjonalny schemat blokowy programu do wyznaczania tablic oraz kreślenia wybranych nawojów. $\bar{l}_i$ — średnia długość wiązki nieprzeplecionej.

2.4 Podsumowanie

Tablica nawojów posiada następujące właściwości:

1. Podaje wszystkie możliwe przypadki nawojów dla przyjętej liczby naturalnej podziału obwodu rdzenia (szerokości wiązki e_x), wyznaczonej z zależności $n = \pi d/e_x$ (np. $n = 11$).
2. Do określenia nawoju wystarczą jedynie dwie liczby: numer tablicy oraz numer nawoju – N_r, zapisane w postaci, np. 11/3. Z tak przedstawionych liczb wyznacza się współczynnik reszty skoku nawijania a=3/(2·11)=3/22 (rys. 2.5, strona 23).
3. Przy stosowaniu metody tablicowej musi buć spełniony warunek: $\pi d \geq 2e_x$. Wtedy kąt nawijania α zawiera się w przedziale: $0° < \arctan\frac{2e_x}{s} < 90°$.
4. Kąt nawijania α nie ma wpływu na wygląd samej tablicy nawojów.
5. Kąt nawijania ma wpływ na współczynnik skali pomiędzy wymiarami osi skoku s i obwodu πd (rys. 2.9, strona 28).
6. Tablica pozwala w szybki sposób ocenić i wybrać najlepszy nawój ze względu na średnią długości wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ (długość wiązki pomiędzy przeplotami), np. przy pomocy przedstawionego w punkcie 2.3.6, strona 34 programu komputerowego.
7. Tablica nawojów może być przydatna przy ustawianiu nawijarek łańcuchowych na wymagany nawój (punkty 2.3.4, strona 32 i 4.3.3, strona 62).
8. Pozwala wybrać najlepszy nawój ze względu na wymaganą długość nawijanego elementu kompozytowego, stopniowaną współczynnikiem a oraz ocenić zużycie materiałowe (punkt 2.3.2, strona 30).
9. Lepsze właściwości wytrzymałościowe kompozytowych elementów nawijanych można uzyskać wykonując nawoje dwuwarstwowe, wyznaczane np. z tablicy nawojów (punkt 2.3.3, strona 31).
10. Jest dobrą bazą do zbudowania programu komputerowego wspomagającego projektowanie lub sterowanie procesem nawijania.

Należy rozważyć, czy istnieje związek pomiędzy długością wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ i szerokością wiązki w nawoju e. Na podstawie wyglądu zniszczonych próbek rurowych po badaniach ciśnieniowych oraz na skręcanie, omawianych w części doświadczalnej pracy, można sądzić, iż badanie tej relacji jest uzasadnione.

Rozdział 3

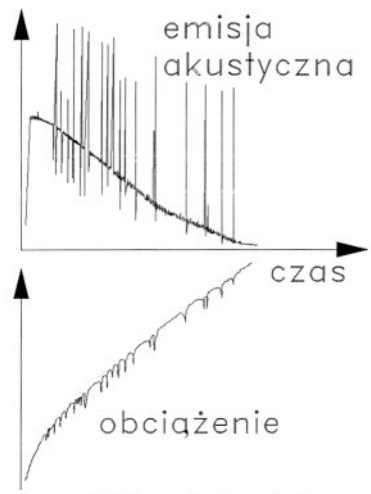
Emisja akustyczna (EA) w badaniach kompozytów

EA znalazła szerokie zastosowanie w badaniu różnych zjawisk w materiałach kompozytowych. W przeglądzie [50] autor wyszczególnia aż jedenaście różnych zagadnień, w których EA ma znaczenie przy badaniu kompozytów: od reoefektów występujących w tych materiałach do wpływu środowiska na ich właściwości. Jednakże największe możliwości zastosowania badań EA sprowadzone są do czterech podstawowych zagadnień:

1) możliwości określenia mechanizmu uszkodzeń materiału,
2) wyznaczanie charakterystyk rozwoju uszkodzenia materiału z upływem czasu lub wzrostem naprężenia,
3) optymalizacji właściwości produktów z materiałów kompozytowych,
4) redukcji liczby próbek wymaganych w różnych badaniach.

Materiały kompozytowe pod wpływem naprężenia ulegają różnego rodzaju mechanizmom uszkodzeń, do których należą pęknięcia osnowy i włókien, rozwarstwienia (delaminacja), pęknięcia na granicach faz czy pęknięcia typu „mostek", wynikłe z lokalnych koncentracji naprężenia, jak również uszkodzenia związane z plastycznym płynięciem materiału. Uszkodzenia te omówiono we wstępie. Pewne z tych mikrouszkodzeń powstają przy bardzo niskim poziomie naprężeń, inne zaś poprzedzają generalne zniszczenie materiału. W zależności od przeznaczenia konstrukcji mogą być zupełnie nieszkodliwe lub – wręcz przeciwnie – mogą być przyczyną bardzo poważnych awarii w krótkim czasie. Do obserwacji powstawania i rozwoju takich uszkodzeń w materiałach kompozytowych metoda EA jest bardziej przydatna niż inne metody badawcze gdyż:

- jest metodą o dużej czułości,
- pozwala prowadzić obserwacje na bieżąco,
- swoim zasięgiem obejmuje duże obszary konstrukcji, a nawet całe konstrukcje,
- umożliwia lokalizację powstałych uszkodzeń,
- w licznych przypadkach niesie informacje o rodzaju uszkodzenia,
- pozwala prowadzić obserwację propagacji uszkodzeń.



Rysunek 3.1: Wykres rozciągania próbki metalowej kompozytu złożonego z pojedynczego włókna wolframowego w osnowie miedzianej (wykres dolny) i odpowiadający mu (wykres emisji ciągłej) RMS. Na tle ciągłej emisji z osnowy wyraźne trzaski pochodzące z fragmentacji włókna.

3.1 Kierunki zastosowań EA

W pracach [98, 99], badając kompozyt ES zbrojony jednokierunkowo, zaobserwowano, iż liczba zdarzeń EA wzrasta gdy maleje szybkość odkształcania, czego nie obserwuje się w kompozycie EG (epoksydowo-grafitowym) [50]. Przy badaniach zmęczeniowych kompozytu obserwowano szybki wzrost uszkodzeń (jako liczby impulsów EA) dla pierwszych cykli i w końcowym stadium zmęczenia, podczas gdy większa część procesu zmęczenia pomiędzy nimi charakteryzowała się niskim przyrostem uszkodzeń [40]. Tymczasem w pracy [42] porównywano rozwój uszkodzeń zmęczeniowych w kompozytach ES i EG. I tak stwierdzono, że w EG już po kilku cyklach jest bardzo niski poziom uszkodzeń, aż do około 90% liczby cykli, zaś w kompozycie ES uszkodzenia narastały nawet przy poziomie 30% granicy zniszczenia. W pracy [67] badano funkcję akumulacji uszkodzeń w zależności od przedłużonego przetrzymywania kompozytu EG na danym poziomie obciążeń, przy czym miernikiem uszkodzeń były obserwowane efekty akustyczne. Na tej podstawie autorzy sądzą, iż całkowity poziom uszkodzeń nie zależy od historii obciążania. Zależy od czasu dojścia do tego poziomu uszkodzeń. Te i podobne informacje pozwalają uzależniać funkcję uszkodzeń od takich czynników jak poziom obciążania, czas, historia obciążania, czy szybkość obciążania. Bez stosowania EA budowa takich funkcji byłaby bardziej czasochłonna i wymagałaby znacznie większych nakładów finansowych. W badaniach płyt z materiałów kompozytowych z wykorzystaniem EA, można wnioskować, że udary uszkadzają materiał lub też są całkowicie bezpieczne przy określonym impulsie siły [84].

EA pozwala zaobserwować chwilę pękania kruchego składnika kompozytu. W pracy [85] określono tak naprężenia, przy których powstają pęknięcia włókien Nb_3Sn w osnowie miedzianej, zaś w [43] uzyskano informacje o pękaniu włókien grafitowych przy braku osnowy i w osnowie epoksydowej w różnym stanie jej usieciowania. Autorzy [69] stosowali EA do obserwacji procesu pękania kompozytu Mo/Al_2O_3. W pracy [111] obserwowano pęknięcia włókien wolframowych na tle ciągłej emisji z osnowy miedzianej (rys. 3.1 [50]).

Przykłady innych prac, w których obserwowano pękanie kompozytu jednokierunkowego *Bo/Al*, lecz rozciąganego w różnych kierunkach oraz przy badaniu tego kompozytu na próbkach z karbem, podane są w pracy [50]. Tamże przytoczone są przypadki rejestracji poziomu ciśnień, przy których następują pęknięcia w zbiornikach ES.

Metoda EA pozwala określić zmiany takich wielkości fizycznych jak moduł dynamiczny [49, 88], czy tłumienie ze zmianami częstości własnych (rezonansowych) lub podatność próbek. Przykłady takich prac zacytowane w [50] oznaczają, że dane EA mogą być korelowane z obserwowanymi zmianami innych wielkości fizycznych charakteryzujących kompozyt. Zmiany te wywołane są narastaniem poziomu uszkodzenia w próbce. W próbach z karbem obserwacje EA, oprócz wspomnianych zmian np. podatności, mogą być łączone z wielkością pęknięcia kompozytu [107], co wykonano dla kompozytu ES.

Zupełnie specyficzny typ informacji niosą dane EA przy badaniu procesu usieciowania (utwardzenia) kompozytu. Dane te pozwalają pośrednio ocenić jakość otrzymanego materiału. Wpływ na właściwości kompozytu może mieć szybkość schładzania w procesie sieciowania, a obserwacje EA pozwalają ocenić wielkość skurczu faz względem siebie kiedy mogą powstać naprężenia skurczowe prowadzące do powstawania pęknięć. Tak więc monitorowanie procesu utwardzania kompozytu dostarcza pośrednio informacje, które pozwalają na ulepszenie materiału przez zmniejszenie powstałych naprężeń szczątkowych i mniejszych uszkodzeń z nimi związanych [53]. Równocześnie obserwacje EA pozwalają optymalizować dobór składu materiału osnowy kompozytu. Odporność na pękanie kompozytu jest wyższa, gdy poziom EA pochodzący z materiału osnowy jest obniżony.

Obserwacje EA pozwalają również śledzić zachowanie włókien w kompozycie. I tak w pracy [54] stwierdzono, że przy rozciąganiu zbrojonego jednokierunkowo kompozytu ES poziom EA pochodzący z osnowy jest o wiele wyższy niż w przypadku identycznego kompozytu EG. Stwierdzono przy tym, że kompozyt EG pęka bez ostrzeżenia przed ostatecznym złomem, a więc zupełnie inaczej niż kompozyt ES. Podobne zjawisko obserwowano w pierścieniach i zbiornikach EG [44] oraz w kompozycie aluminiowym (metalowym). Inne prace poświęcone efektom wpływu wzrastającej ilości włókna szklanego (przy rozciąganiu) wskazują, że zdarzenia EA o wysokiej amplitudzie występują przy niskim naprężeniu w stosunku do poziomu zniszczenia. Krzywa sumy impulsów wzrasta eksponencjalnie przy niskich naprężeniach z zawartością włókna szklanego [50].

EA umożliwia badanie odspojeń włókna i osnowy. W pracy [101] badano zjawiska te dla kompozytu ES, wyróżniając trzy różne sposoby zachodzenia tego uszkodzenia. W dalszych pracach wskazywano na wykorzystanie EA do przygotowywania powierzchni włókna celem lepszego jego łączenia z osnową. EA może być również pomocna w obserwacjach pęknięć kompozytu przy zmęczeniu temperaturowym. W innych pracach wykorzystuje się zjawiska EA do obserwacji degradacji kompozytu narażonego na wpływ środowiska korozyjnego [41, 47]. Należy zaznaczyć, iż praca [47] była jedną z pierwszych prac tego typu w świecie i została wykonana we Wrocławiu. Dalsze prace z tego zakresu pozwoliły na optymalną ocenę ułożenia warstw struktury butli ES, co prowadzi do wniosku, że EA jest najbardziej użyteczna w projektowaniu takich konstrukcji [50].

Przy badaniu kompozytów należy zwrócić uwagę na zjawisko propagacji fali oraz anizotropii propagacji fali. Ze względu na duży współczynnik tłumienia (w stosunku do metali) zjawiska te muszą być uwzględnione przy badaniach. Również badanie EA wymaga zminimalizowania wpływu szumów pochodzących z otoczenia i temu zagadnieniu musi być poświęcona duża uwaga.

3.2 Metodyka badań EA

Badania zjawiska EA z materiałów kompozytowych pozwoliło na opracowanie w połowie lat osiemdziesiątych standardów ASTM na praktyczne zastosowanie EA do oceny rur [4] i zbiorników [5] wykonanych z tych materiałów. Podstawowe zasady przy badaniu rur i połączeń rurowych ES i EW podane są w normie [4]. Norma odnosi się tylko do konstrukcji zawierających więcej niż 15% wagowych zbrojenia, przewidzianych na ciśnienia poniżej 35 MPa (ok. 350 atm) i średnicy do $0.6m$. Takie konstrukcje rurowe mogą być badane w stanie dziewiczym (jako nowe produkty) lub w czasie ich eksploatacji. Jako wielkości oceniające jakość konstrukcji, a w szczególności miejsca połączeń i rozgałęzień, które są najbardziej wrażliwe, stosuje się otrzymywane z doświadczenia wielkości:

- stosunek tzw. „felicity",
- występowanie zdarzeń (impulsów) o wielkości przekraczającej tzw. wysokoamplitudowy poziom,
- wartość M–sygnału,
- stosunek impulsów N_c (wysokoamplitudowych od niskoamplitudowych, powyżej którego powinno się mierzyć EA pochodzącę z kompozytu).

Do pomiaru EA przewiduje się zastosowanie czujników z dopasowanym torem pomiarowym, pracujących w paśmie 100 do 250 kHz z filtrami pasmowymi na ten zakres, bądź też z filtrami górnoprzepustowymi.

Pierwsza wielkość oceniająca kompozyt opiera się na efekcie felicity. Polega on na występowaniu EA przy określonej stałej czułości poziomu rejestracji sygnału dla naprężenia w badanym materiale, niższego niż poprzednio stosowane (lub wywoływane warunkiem pracy). Stosunek tych naprężeń podaje tzw. ułamek felicity (w procentach). Poziom niskoamplitudowy określony jest przy łamaniu wzorca ołówkowego twardości $2H$ i średnicy grafitu 0.3 mm przy długości pręcika 2.5 mm i kącie pochylenia 30°. Sygnał z tego pęknięcia odbierany jest przez czujnik z odległości 130 cm na płycie ołowianej o wymiarach $180\times120\times1.3$ cm.

Poziom wysokoamplitudowy wyznaczą łamania wymienionego wzorca na płaskowniku stalowym o wymiarach $300\times5\times2$ cm z odległości 210 cm od czujnika.

Wartość M–sygnału wyznacza się elektroniczną kalibracją jako wskaźnik adhezyjnych połączeń. Normalizowany impuls 150 kHz wprowadzony do próbki po przejściu przez złącze jest miernikiem jakości połączenia.

Wartość impulsu N_c określa się łamiąc wspomniany wzorzec ołówkowy na rurze od punktu kalibracji w dwóch odległościach o położeniu kątowym różniącym się o 45° tak, aby amplituda $[dB]$ była pomiędzy poziomami niskich i wysokich amplitud. Odpowiednio przekroczona liczba impulsów jest wskaźnikiem dla oceny badanego kompozytu.

Pomiar jakości rur kompozytowych polega na stosownym obciążeniu w czasie, zgodnie z podanymi w normie [4] schematami dla różnych przypadków badawczych (nowoobciążone konstrukcje, elementy konstrukcji, konstrukcje pracujące, czy znajdujące się pod ciśnieniem) z jednoczesną obserwacją EA. W każdym przypadku wymaga się zminimalizowania szumów zewnętrznych, zaburzających pomiar. Wymagana jest znajomość współczynnika tłumienia, przez pomiar osłabienia impulsu ołówkowego z odległości 150 i 300 mm w kierunku osi rury i w kierunku nachylonym pod kątem 45°. Jeśli obserwuje się podczas obciążania gwałtowny (eksponencjalny) wzrost natężenia impulsów jest to wskazówka, że

występuje niekontrolowany wzrost uszkodzeń i badanie należy przerwać. Ocenę zachowania kompozytu opiera się szczególnie na okresach obciążania na stałym poziomie, gdyż szumy zaburzające są wówczas zminimalizowane. Współczynnik felicity jest szczególnie użyteczny w badaniu już pracujących konstrukcji. Dla nowych konstrukcji tym szczególnym wyznacznikiem jakości konstrukcji powinny być zdarzenia wysokoamplitudowe, na ogół związane z pękaniem włókna. W sprawozdaniu z badań należy między innymi zaznaczyć, które z podanych efektów przyjmuje sią za przekonywujące o przyjęciu, względnie odrzuceniu badanej konstrukcji czy elementu.

Podobnie prowadzi się badanie zbiorników nadciśnieniowych (również próżniowych) [5]. Jednakże ogranicza się ciśnienie do 0.44 MPa. Różnice istotne: proponuje się stosowanie pewnej liczby czujników wysokoczęstotliwościowych, które mając znacznie mniejszy obszar nadsłuchu i znacznie lepiej eliminują zewnętrzne zaburzenie.

Przy pomiarze atenuacji fali (wytłumiania) przez test łamania grafitu obserwacje prowadzi się wzdłuż włókien wierzchnich zbiornika – jeśli wiadomo jak są nawinięte – i w kierunku nachylonym do tamtego pod kątem 45°. Odległości są takie same jak dla rur.

W ocenie konstrukcji kompozytowej należy zwrócić szczególną uwagę na emisję podczas okresów utrzymywania stałego ciśnienia i stosunek felicity (dla pracujących zbiorników). EA jest znaczna jeśli występuje więcej niż 5 trzasków wysokoamplitudowych przy 10% wzroście obciążenia lub więcej niż $N_c/25$ impulsów przy 10% wzroście obciążenia (N_c wyznaczone z łamania ołówka). Ocena bazowana na skumulowanej liczbie impulsów jest wartościowa w przypadku zbiorników „atmosferycznych" i próżniowych. Jednakże biorąc pod uwagę, że dziewiczy zbiornik przy pierwszym obciążeniu wykaże wzmożoną aktywację akustyczną, których podłożem nie są uszkodzenia strukturalne, stosowanie takich ocen do tych zbiorników powinno być ograniczone.

Wśród wielu metod oceny adhezji między włóknem a osnową metoda analizy EA jest bardzo dobrym uzupełnieniem standardowych badań mechanicznych [57]. Liczba zdarzeń akustycznych i poziomu głośności emisji w zakresie ultradźwiękowym w trakcie obciążenia elementów kompozytowych daje obraz jakości kompozytu. Podstawowe źródła EA w laminatach ES są następujące:

- pękanie osnowy polimerowej,
- pękanie włókien wzmacniających,
- wyciąganie włókien z osnowy,
- dekohezja na granicy faz polimer – wzmocnienie.

Mając na uwadze dodatkowe, tzw. technologiczne niejednorodności (będące następstwem procesu konstruowania materiału) należy liczyć się z faktem, iż wiarygodne wyniki pochodzą z obszaru w sąsiedztwie czujnika (np. w promieniu 10 czy 15 cm). Urządzenie AMS3 firmy VALLEN, znajdujące się w IMMT w wersji czterokanałowej z odpowiednimi typami czujników, umożliwia obserwacje całościowe obiektu o maksymalnym rozmiarze ok. 1 m zbudowanego z kompozytu ES. Szeroki opis zestawu AMS3, oraz zasady pomiaru EA w materiałach ES zawarto w [18].

3.3 Układ badawczy EA

Urządzenie AMS3 do rejestracji EA firmy VALLEN składa się z czterech czujników typu SE–150M (będących odpowiednikami amerykańskich czujników firmy DUNEGAN). Czujniki mogą pracować w zakresie temperatur $-50°$ do $+100°C$. Charakterystyka częstotliwościowa – od 100 do 500 kHz – jest dość płaska z pikiem w okolicy 150 kHz (około 7 dB ponad średni poziom charakterystyki). Szerokość stopki czujnika wynosi 0.8 cala (około 20 mm). Czujnik miał akustyczne sprzężenie z próbką przez film z oleju silikonowego firmy BERG GmbH HEIDELBERG typ KP-862, specjalnie przeznaczony do zwilżania głowic ultradzwiękowych.

Sygnał z czujnika podawany jest na niskoszumowy przedwzmacniacz o charakterystyce dopasowanej do parametrów czujnika, a następnie podawany na układ centralny AMS3 do wzmocnienia i obróbki sygnału EA. Zastosowane całkowite wzmocnienie sygnału wynosiło 40.7 dB (przy poziomie odcięcia sygnału 34 dB we wszystkich kanałach). Wartości te wybrano jako optymalne na podstawie obserwacji własnych przy badaniu materiałów kompozytowych o składzie zbliżonym do materiału butli [18]. Układ centralny przyjmuje zarazem dane z pomiaru: momentu skręcającego, kąta skręcenia lub ciśnienia i jako jeden z parametrów kojarzy z wynikami bieżącymi EA. Całość jest sterowana przez komputer, w którym zapisywano również wyniki pomiaru. Widok aparatury AMS3 przedstawiono na rys. 4.34, strona 89.

3.4 Przygotowawcze badania EA rur skęcanych

Przed przystąpieniem do badań rur kompozytowych przeprowadzono szereg badań poznawczych:

1) badania porównawcze prędkości rozchodzenia się fal akustycznych oraz ich tłumienia w sztabce żywicy epoksydowej oraz pręcie ES o 77% udziale objętościowym włókna szklanego,
2) badania prędkości rozchodzenia się fal akustycznych w kompozytowych rurach próbnych o różnych długościach,
3) badania tłumienia fal akustycznych pochodzących z czujników oraz testu ołówkowego,
4) sprawdzanie wpływu rozmieszczenia czujników na prędkość i tłumienie fali akustycznej.

Wymienione badania poznawcze oraz ich rezultaty omówiono szerzej w pracy [18]. Poniżej zamieszczono ważniejsze aspekty badań poznawczych EA.

Każdorazowo, badając nową konstrukcję z wykorzystaniem EA, bada się propagację fali pomiędzy czujnikami układu lokalizacji źródeł emisji. Każdy czujnik wysyła standardowy impuls szpilkowy, a pozostałe czujniki ten sygnał odbierają. Na badanych rurach stosowano standardową odległość przy liniowej lokalizacji, wynoszącą 10 cm między kolejnymi czujnikami. Kolejność czujników wynosiła „4$\longleftrightarrow$1$\longleftrightarrow$2$\longleftrightarrow$3" bowiem tylko w kanale „1" istnieje możliwość rejestracji przebiegów czasowych z równoczesną ich szybką analizą Fouriera (FFA), a pożądane było aby czujnik 1 miał położenie w pobliżu miejsca centralnego.

nr próbki	odległość $10cm$ $4 \longleftrightarrow 1$ $[\frac{cm}{ms}]$–$[dB]$	odległość $10cm$ $1 \longleftrightarrow 2$ $[\frac{cm}{ms}]$–$[dB]$	$10cm$ $2 \longleftrightarrow 3$ $[\frac{cm}{ms}]$–$[dB]$	odległość $20cm$ $4 \longleftrightarrow \longleftrightarrow 2$ $[\frac{cm}{ms}]$–$[dB]$	$20cm$ $1 \longleftrightarrow \longleftrightarrow 3$ $[\frac{cm}{ms}]$–$[dB]$	odległość $30cm$ $4 \longleftrightarrow \longleftrightarrow \longleftrightarrow 3$ $[\frac{cm}{ms}]$–$[dB]$
1.1	227–12	249–10	237–7	265–17	229–23	234–23
	225–12	249–11	238–8	265–17	229–22	234–24
1.6	213–20	224–12	224–7	224–30	245–18	231–37
	215–20	225–11	225–7	207–36	245–19	195–39
2.1	243–18	224–19	234–17	247–26	260–27	250–37
	234–18	224–21	234–16	248–26	260–29	249–37
3.2	213–26	151–25	226–14	167–33	163–25	209–26
	179–28	151–25	226–16	165–33	187–28	208–27
4.5	105–35	122–26	185–27	147–30	95–43	125–39
	103–31	123–28	184–28	140–29	95–43	125–39
5.5	189–13	189–12	172–14	209–26	222–17	213–29
	182–13	191–9	160–15	215–25	222–17	213–29

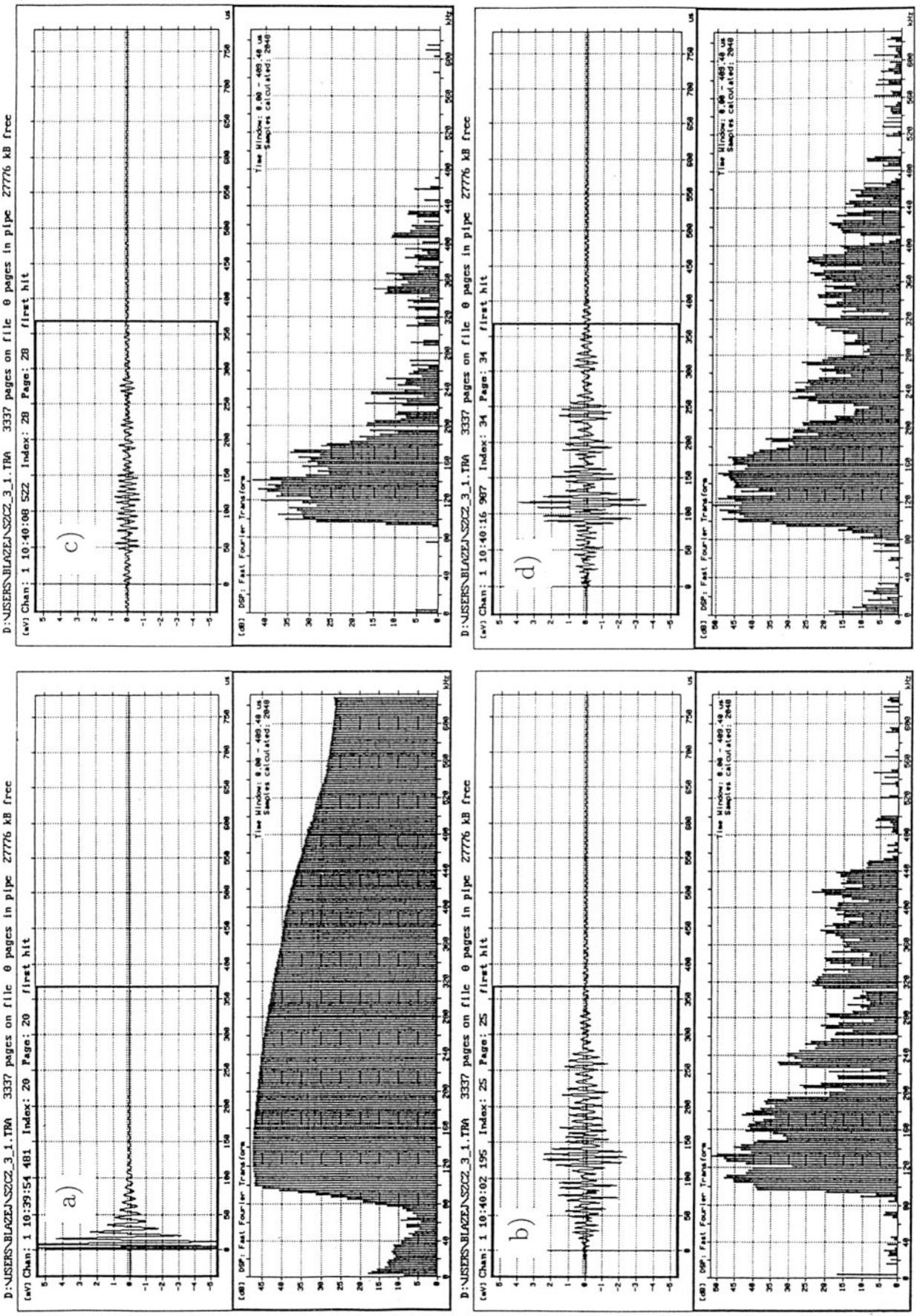
Tablica 3.1: Wyniki pomiarów prędkości i obok nich spadek amplitud.

Badania wykazały, że odklejanie i powtórne przyklejanie czujnika nie jest bez wpływu na powtarzalność wyników. W związku z tym starano się prowadzić wszystkie badania EA bez odklejania czujników z miejsc wybranych do obserwacji.

Nadawany sygnał jest typu szpilkowego o amplitudzie 86 dB. Przykład takiego sygnału wraz z jego obrazem FFT przedstawia rys. 3.2. Jak widać charakterystyka częstotliwościowa bardzo dobrze odpowiada impulsowi szpilkowemu, bowiem od około 100 kHz (poniżej ograniczają to filtry układu dopasowania) do maksymalnych wartości, w których pracuje układ EA, charakterystyka FFT jest płaska. Wielokrotne powtarzanie sygnału wysyłanego utwierdza o doskonałej powtarzalności jego wszystkich parametrów.

Wyniki pomiarów prędkości sygnałów (podawane są w [cm/ms]) oraz obok nich spadek natężenia w [dB] (druga liczba) przedstawiono w tabeli 3.1. Wyniki pomiaru wskazują generalnie na pewne prawidłowości:

1. Większa prędkość sygnału związana jest z jego mniejszym tłumieniem. Wytłumaczenie tego zjawiska wydaje się mieć pełne uzasadnienie w obserwacji czasowych przebiegów [18]. Czas przebiegu wyznaczony był pierwszym przekroczeniem poziomu progowego przez falę docierającą do czujnika odbiorczego. W przypadku dużego osłabienia wyzwolenie rejestracji jest opóźnione, bowiem pierwsza fala związana jest na pewno z falą objętościową (najszybszą) i ma mały udział w ogólnym przebiegu fali.
2. W większych odległościach (30 cm) obserwuje się z reguły bardzo silne osłabienie sygnału o około $30dB$ i więcej. Stąd też wyniki są w znacznej mierze obarczone dużym błędem. Uzasadnienie tego jest związane z większym rozrzutem chwili wyzwolenia pomiaru dla słabej fali odbiorczej.
3. Zastanawiająco rozbieżne są wyniki przy pomiarze w jednym kierunku i w kierunku przeciwnym pomiędzy tymi samymi czujnikami (np. próbka 1.6) dla pary czujników



Rysunek 3.2: Przebiegi czasowe impulsów z kolejnych czujników 4⟷1⟷2⟷3 odbieranych przez czujnik 1. a) – kształt impulsu nadawanego, b), c) i d) – kształt impulsów nadawanych przez czujniki 2, 3 i 4. Do każdego impulsu dołączony jest poniżej obraz jego widma FFT.

4⟷2 i 4⟷3. Zjawisko to nie jest jeszcze jednoznacznie wyjaśnione, lecz wydaje się, że związane to jest z efektami przyklejania czujników (lub krótkich falowodów dopasowanych do rury o dużej krzywiźnie). Nie można jednak doszukiwać się tu tłumienia w kierunku włókien podpowierzchniowych, ponieważ kąt nachylenia do tworzącej we wszystkich próbkach był jednakowy – $\alpha_1 = 45°$.

4. Pewne anomalie (tłumienie na dużej długości jest słabsze niż na długości krótszej) można wyjaśnić wyłącznie efektami interferencyjnymi. Takie obserwacje zostały poczynione na testach z różnych odległości, które w szczególności zostały wykonane na próbkach płaskich. Niemniej jednak te obserwacje muszą być rozwinięte, by można było bardziej precyzyjnie otrzymywać lokalizację defektów kompozytu.
5. Obserwacje wyników FFT fal z różnych odległości świadczą o tym, że wysokoczęstotliwościowa część widma jest bardzo szybko eliminowana, a w części widma podstawowej między 100 i 250 *kHz* coraz większe znaczenie odgrywają rezonanse czujnika.

3.5 Przebieg badań EA rur skręcanych

Poszczególne próbki badano według następujących etapów:

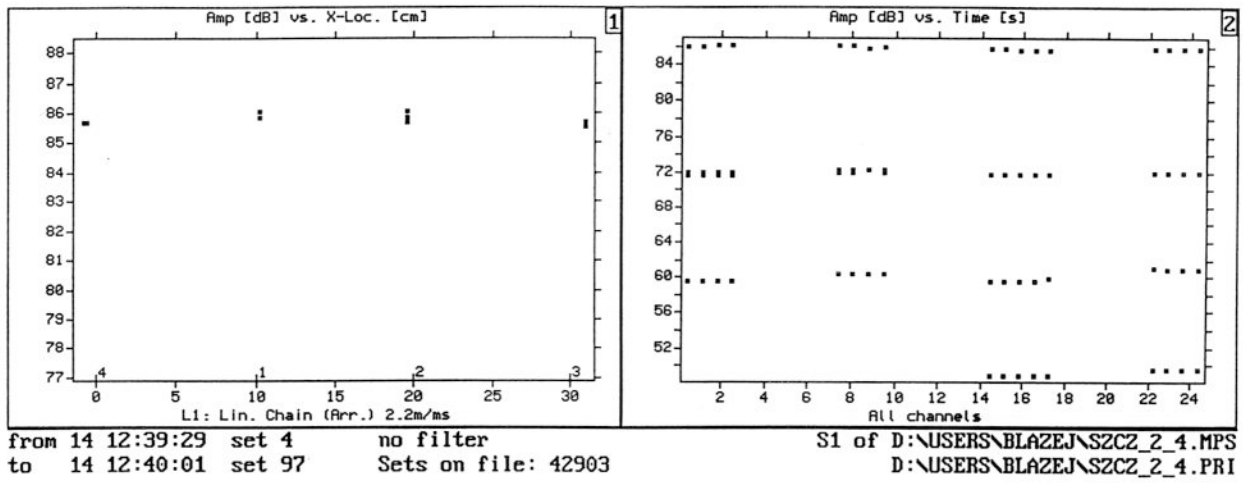
1) autokalibracja,
2) testy ołówkowe,
3) badanie szczegółowe rur, przedstawione w punkcie 4.3.6, strona 67.

Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów w funkcji czasu, obciążania i kąta skręcenia. W górnej części wykresów wpisano współrzędne oraz jednostki. W opisie wykresów numer wykresu (zamieszczony w górnym, prawym rogu) podano w nawiasach ( ).

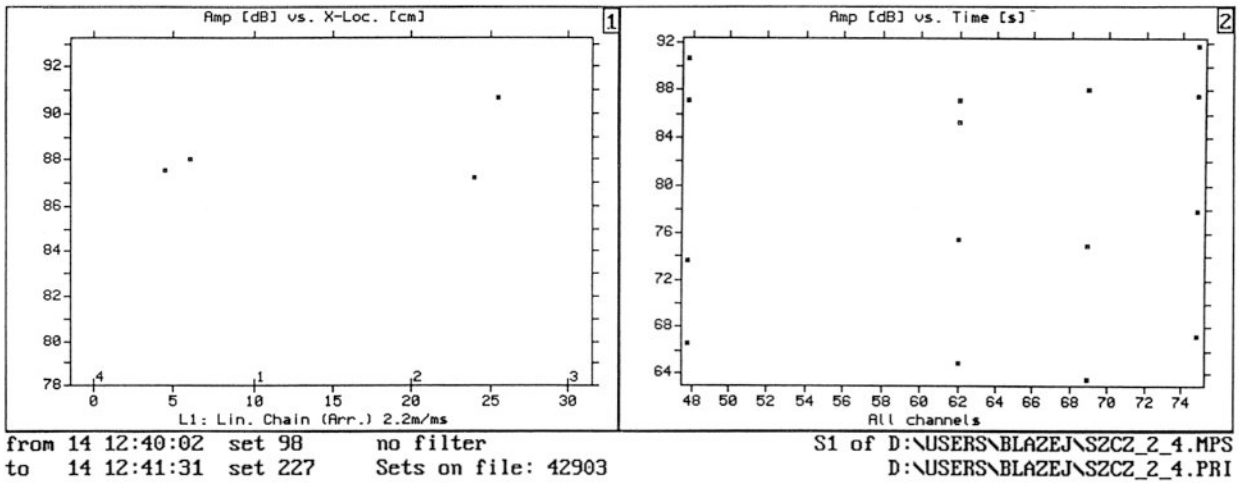
W pamięci komputera próbki oznaczono dwoma cyframi, np. 5–4, co oznacza próbkę rurową z nawojem N_r5 i czwartą z kolei. To oznaczenie jest widoczne w dolnym, prawym rogu rysunków. W dolnym lewym rogu rysunków widać przedział czasowy, dla którego wykonano wykres (godzina oraz numer zdarzenia). Po środku zamieszczony jest numer ostatniego zdarzenia akustycznego w pliku.

3.5.1 Autokalibracja

Podstawowy test wykonywany przez aparaturę akustyczną AMS3 polega na wysyłaniu ściśle określonego impulsu szpilkowego kolejno przez czujniki i odbieraniu ich przez pozostałe (rys. 3.2). Na rys. 3.3 przedstawiono wykresy z autokalibracji. Pierwszy z nich (rys. 3.3(1)) przedstawia wykres lokalizacji wysyłanych przez czujniki impulsów ze względu na rozkład amplitud na długości rury skręcanej. Drugi wykres (rys. 3.3(2)) przedstawia zarejestrowaną amplitudę impulsów w czasie trwania autokalibracji. Górne (86 dB) cztery rzędy kropek to impulsy nadawcze kolejnych czujników. Widoczne punkty na poziomach 72, 60 i 49 dB to sygnały odbiorcze od czujników nadawczych z odległości 10, 20 i 30 cm. Taki wykres świadczy o dobrym umiejscowieniu czujników ze względu na tłumienie sygnału.



Rysunek 3.3: Wykresy impulsów autokalibracji: (1) lokalizacja impulsów (czujników) na długości próbki, (2) wartości amplitud w czasie, dla kolejnych czujników.



Rysunek 3.4: Wykresy przedstawiające wyniki testu ołówkowego wykonanego na badanej rurze ES: (1) lokalizacja zdarzeń ze względu na amplitudę na długości rury, (2) zarejestrowana amplituda impulsów w czasie trwania testu ołówkowego.

3.5.2 Test ołówkowy

Polega na łamaniu grafitu ołówka w sposób ściśle określony w [4]. Zabieg ten odpowiada wzorcowi pękania włókna w kompozycie. Impuls ten musi być wyłapany przez czujniki. Rys. 3.4 przedstawia wykresy przeprowadzonego na rurze próbnej testu ołówkowego. Podobnie jak dla autokalibracji kolejne wykresy przedstawiają lokalizację impulsów na długości skręcanej rury oraz zarejestrowaną amplitudę impulsów z testu ołówkowego. Na podstawie rys. 3.4(2) można ocenić kolejność wystąpienia impulsów testu ołówkowego.

3.6 Układ pomiaru EA butli kompozytowych

Schemat zestawu pomiarowego AMS3 przedstawiono na rys. 4.33, strona 88 oraz na zdjęciach rys. 4.34, strona 89. Niektóre zagadnienia dotyczące układu pomiarowego EA zawarto w punkcie 3.3, strona 42. Urządzenie AMS3 posiada tylko w kanale pierwszym szybki rejestrator sygnału akustycznego w funkcji czasu, zawierający dalsze układy przetwarzania danych. Dlatego też czujnik tego kanału umieszczono na butli najbliżej kołnie-

rza króćca, licząc się z tym, że obserwacje zdarzeń emisyjnych z tego obszaru mogą mieć szczególne znaczenie. Pozostałe czujniki rozmieszczono w równych odstępach (250 *mm* rys. 4.36, strona 90) wzdłuż tworzącej walca butli, stosując do namiaru ewentualnych zdarzeń EA system liniowy. Takie położenia czujników i ich odległości gwarantowały nadzór nad całą objętością płaszcza butli (tłumienie sygnału nie gubiło informacji).

Na zdjęciu rys. 4.34a, strona 89 widoczna jest badana butla (8), do której przytwierdzone są cztery czujniki EA (9). Butla spoczywa w specjalnej pancernej osłonie bezpieczeństwa (10) i położona jest na widocznych na zdjęciu podkładkach wytłumiających przekazywane do butli zewnętrzne zaburzenia (szum) z otoczenia. Podkładki te zarazem eliminują w dużej mierze możliwość wystąpienia zaburzeń pochodzących od tarcia pomiędzy butlą a osłoną bezpieczeństwa, które może powstać przy przypadkowych przemieszczeniach butli podczas zwiększania ciśnienia. Na zdjęciu widoczne są czarne opaski gumowych uchwytów czujników akustycznych oraz czerwone kable łączące czujniki z przedwzmacniaczami układu. W skład osłony bezpieczeństwa wchodzi pokrywa wykonana z użebrowanej blachy o grubości 4 mm. Pokrywa zabezpiecza przed strumieniem oleju, który powstaje w wyniku rozerwania butli. Szeroki opis zestawu AMS3 do pomiaru EA zamieszczono w [18].

3.7 Testy przygotowawcze pomiaru EA butli kompozytowych

Zasady przeprowadzania testów poznawczych i przygotowawczych pomiaru EA przedstawiono w [18, 20, 21, 22]. Niektóre z nich omówiono w punkcie 3.4, strona 42.

Istotne cechy konstrukcyjne butli, które mogą mieć wpływ na EA, a które nie są tutaj omawiane to:

- inny sposób zbrojenia części walcowej i dennic,
- miejsca spawane dętki wewnętrznej, wskazane na rys. 4.36, strona 90,
- powierzchnia styku dętki z kompozytem.

Najważniejszym celem przy wykonywaniu oplotu kompozytowego było uzyskanie nawoju N_r1, a następnie nawoju o dużej liczbie przeplotów – N_r7, jednak oba nawoje musiały pochodzić z tej samej tablicy. Osiągnięto ten warunek kosztem nawinięcia dłuższych wiązek rowingu na dennice. Oznacza to, iż grubość kompozytu na dennicach jest około dwa razy większa niż w części walcowej oraz ułożenie rowingu na dennicach jest głównie obwodowe. Dodatkowo dennice zbiornika wewnętrznego wykonano z grubszej blachy niż część walcową. Taka konstrukcja butli wyklucza powstanie zniszczenia na dennicy i nie jest ona przedmiotem analizy.

Na butlach, w miejscach umieszczania czujników akustycznych, wykonano nadlewki z elastycznego syciwa epoksydowego produkcji krajowej (żywica EPINIAN 5 i utwardzacz PAC, zmieszane w proporcjach $1 \div 1$). W celu uzyskania równej powierzchni utwardzone nadlewki obrabiano skrawaniem do momentu pojawienia się materiału (kompozytu) płaszcza butli. Wykonano w sumie 12 nadlewków na każdej butli (4 rzędy rozmieszczone co 90°, po 4 w rzędzie). Strony butli oznaczono cyframi rzymskimi i wskazano je na rzutach czołowych butli na rys. 4.36, strona 90.

Jako środek sprzęgający akustycznie stosowano roztwór smaru silikonowego produkcji krajowej i benzyny ekstrakcyjnej. Wyniki porównawczych badań akustycznych prowadzone z wymienionym środkiem sprzęgającym oraz ze środkiem firmowym nie różniły się. Roztwór nakładano na obrobione nadlewki parę dni wcześniej, aby lepiej spenetrował powierzchnię przyłożenia czujnika. Czujniki mocowano za pomocą opasek gumowych, zapewniających docisk czujnika do butli z siłą ok. $1 \div 2$ kg. Jednakowe wymiary opasek zapewniały równą siłę docisku wszystkich czujników.

Przy jałowym ruchu pompy tłoczącej nie stwierdzono impulsów szumów. Przed rozpoczęciem badań, a także każdego kolejnego dnia, obserwowano przez czas ok. 1 *godz.* poziom zewnętrznych szumów. Mimo, iż powyżej amplitudy odcięcia nie obserwowano żadnych impulsów zaburzeń, to przy badaniu butli **4** w początkowym etapie obciążania (w przedziale od 400 do 1000 *s*) pojawiły się szumy z zewnątrz, powodowane innym niezależnym urządzeniem. Założono, iż nie miało to większego wpływu na wynik pomiaru EA, ponieważ po czasie ok. 1000 *s* szumy wyraźnie nikną. Wykres RMS, rejestrowany przez czujnik 2 gdzie nastąpiło zniszczenie, osiąga poziom wyjściowy do czasu 1300 *s* (90 *barów*). Ten punkt uznano za początek EA dla butli **4**.

Badano propagację fali akustycznej zbiornika dla lokalizacji liniowej wszystkich czterech czujników z czterech stron butli **3** i **4** [120, 18]. Wyniki tych badań zamieszczono w tabeli 3.2. Są to wyniki autokalibracji w dwóch stanach wytężenia kompozytu ES (przed badaniami i po badaniach ciśnieniowych). Przedstawione w tabeli 3.2 macierze prędkości rozchodzenia się impulsu szpilkowego, np. dla butli **3** w stanie nienapełnionym przed badaniami ciśnieniowymi mierzone na stronie IV wynoszą: od czujnika 1 do czujnika 2 — 387 *cm/ms*, od czujnika 2 do czujnika 1 — 391 *cm/ms*, od czujnika 4 do czujnika 3 — 306 *cm/ms*. Spadki amplitud przy sygnałach nadawczych 86 *dB* wynoszą: od czujnika 1 do czujnika 2 — 77 *dB*, od czujnika 1 do czujnika 4 — 57 *dB*, od czujnika 4 do czujnika 3 — 77 *dB*. Badania ciśnieniowe butli **3** i **4** prowadzono na stronach IV. Małe wartości rozrzutu z pomiaru prędkości świadczą o dobrym zamocowaiu czujników. Przedstawione wartości (najczęściej 0 lub 1) wyznaczomo z różnicy czterech pomiarów prędkości w punkcie $(v_{max} - v_{min})$.

Z wartości zamieszczonych w tabeli 3.2 wynika, iż w miarę obciążania butli spada prędkość oraz wzrasta tłumienie fali akustycznej. Największą prędkość i najmniejsze tłumienie fali rejestrowano w stanie wyjściowym – nienapełnionej butli po pierwszym etapie utwardzania. W miarę obciążania butli prędkość malała i wzrastało tłumienie fali osiągając minimum pod największym obciążeniem. Po obniżeniu ciśnienia wartości te nieznacznie wzrastały (ok. 6%). Po zniszczeniu rejestrowano najmniejszą prędkość i największe tłumienie fali akustycznej (ok. 11% w stosunku do stanu wyjściowego, butli podtwardzonej). Obszerniejsze wyniki badań dotyczących tego zjawiska zamieszczono w [21]. Brak wartości liczbowych prędkości i amplitud dla butli po badaniach ciśnieniowych jest związany z miejscem powstania zniszczenia (wyrwy) oraz dużym tłumieniem impulsu pomiędzy skrajnymi czujnikami.

Porównanie wyników pomiaru prędkości i amplitud butli **3** i **4** wskazuje, iż kompozytowe płaszcze nośne jako materiały są takie same, a różnice średnich wartości mieszczą się w tolerancji pomiaru. Dodatkowo przebadano propagację fali w tzw. teście ołówkowym, opisanym w punkcie 3.5, strona 45. Wyniki świadczą o dobrym rozmieszczeniu czujników w stosunku do wielkości butli, cały obiekt jest objęty pełną obserwacją tak w zakresie zjawisk nisko- jak i wysokoamplitudowych zdarzeń.

str. po-mia-ru	amplituda [dB]	prędkość średia [cm/ms]	różnice $v_{max}-$ $-v_{min}$	amplituda [dB]	prędkość średia [cm/ms]	różnice $v_{max}-$ $-v_{min}$
	przed badaniami ciśnieniowymi			**po badaniach ciśnieniowych**		
	butla **3**					
I	**86** 81 67 51 80 **86** 84 68 66 84 **86** 80 51 69 82 **86**	246 300 320 246 290 315 298 298 240 321 321 240	0 0 0 0 1 0 5 1 0 0 0 0	**86** 78 56 – 76 **86** 79 50 56 80 **86** – – 50 – **86**	271 237 — 269 292 210 237 292 — — 209 —	1 0 - 7 1 0 0 1 - - 0 -
II	**86** 86 71 62 85 **86** 78 68 73 79 **86** 78 62 69 79 **86**	269 338 339 269 386 344 339 386 397 343 344 397	1 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1	**86** 73 51 – 72 **86** 68 46 50 69 **86** – – 46 – **86**	371 347 — 372 371 230 348 376 — — 230 —	1 1 - 0 1 0 0 1 - - 0 -
III	**86** 81 69 56 82 **86** 82 68 73 83 **86** 86 60 69 87 **86**	289 364 430 290 251 296 364 251 261 430 297 262	1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 1	**86** 68 53 – 68 **86** 72 46 52 72 **86** – – 45 – **86**	306 199 — 311 359 245 253 258 — — 259 —	7 0 - 1 1 0 81 1 - - 0 -
IV	**86** 77 62 57 76 **86** 77 68 62 79 **86** 77 56 68 77 **86**	387 435 373 391 349 287 436 349 305 373 287 306	11 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1	**86** 62 53 – 63 **86** 70 46 53 70 **86** – – 45 – **86**	342 302 — 343 376 245 318 375 — — 259 —	1 25 - 1 1 0 0 0 - - 0 -
	butla **4**					
I	**86** 74 70 59 76 **86** 80 63 72 80 **86** 75 60 64 76 **86**	283 342 311 384 396 374 342 396 375 326 374 376	1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 1 2	**86** – 51 – – **86** – – 50 – **86** 71 – – 79 **86**	— 208 — — — — 211 — 315 — — 315	- 0 - - - - 0 - 1 - - 1
II	**86** 80 69 59 80 **86** 78 70 69 78 **86** 76 56 71 73 **86**	387 352 314 387 387 305 352 386 349 314 305 349	1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0	**86** – 51 – – **86** – – 50 – **86** 73 – – 73 **86**	— 206 — — — — 206 — 328 — — 328	- 0 - - - - 0 - 1 - - 1
III	**86** 79 69 57 82 **86** 77 67 70 77 **86** 73 60 66 72 **86**	335 301 266 335 396 314 303 396 274 267 314 274	1 4 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0	**86** – 50 42 – **86** – – 49 – **86** 74 42 – 75 **86**	— 206 213 — — — 206 — 261 213 — 361	- 0 0 - - - 0 - 1 0 - 1
IV	**86** 74 61 57 74 **86** 73 66 61 73 **86** 76 57 63 75 **86**	369 404 268 370 410 371 405 414 332 268 371 332	1 1 0 0 1 1 0 12 0 0 0 1	**86** – 55 – – **86** – – 54 – **86** 72 – – 73 **86**	— 343 — — — — 344 — 363 — — 363	- 0 - - - - 0 - 0 - - 0

Tablica 3.2: Prędkości i amplitudy impulsów nadawczych przed badaniami ciśnieniowymi i po badaniach ciśnieniowych mierzone z czterech stron butli **3** i **4**.

Rozdział 4

Część doświadczalna

Nie znaleziono opracowań na temat wpływu ułożenia pasm w elementach rurowych na ich wytrzymałość. Prace, które zaledwie dotykają ten problem, to: [6, 32, 39, 61, 63, 70, 89, 103, 106, 109, 119]. Własne badania doświadczalne dotyczą długowłóknistych kompozytów epoksydowo-szklanych (ES) wykonanych techniką nawijania i obejmują:

- badania rozpoznawcze (wstępne),
- badania ciśnieniowe rur,
- badania rur na skręcanie,
- badania ciśnieniowe butli.

Plan badań opracowano przyjmując za podstawę dokumentację [78]. Zawarto tam niezbędne dane dotyczące komponentów ES oraz metody badań.

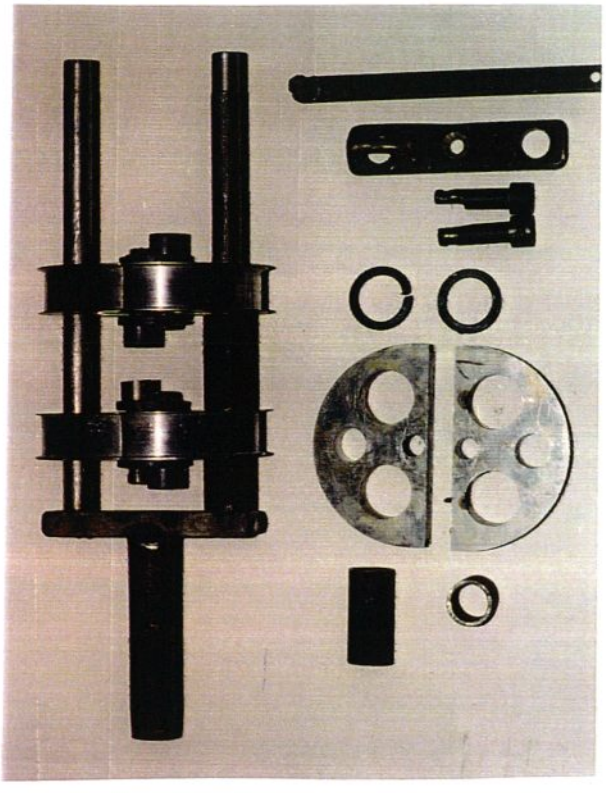
W poprzednim rozdziale opisano zasady prowadzenia pomiaru EA w badaniach rur skręcanych i butli.

4.1 Badania rozpoznawcze długowłóknistych kompozytów epoksydowo-szklanych (ES)

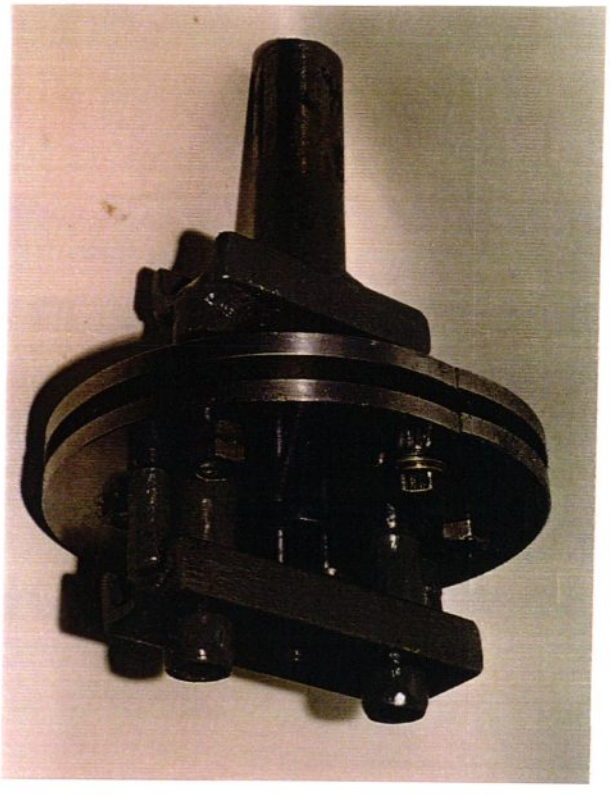
W pierwszej kolejności wykonano badania wstępne, a wyniki przedstawiono w [14]. Badano następujące zagadnienia:

- wielkość i równomierność naciągu włókien w poszczególnych warstwach laminatu i ich wpływ na wytrzymałość [115],
- zminimalizowanie tzw. falowania włókien w dolnych warstwach laminatu, w zależności od liczby etapów utwardzania,
- wyeliminowanie miejscowych niezgodności kierunków włókien z kierunkami naprężeń (powstałych w wyniku działania czynników technologicznych, mających na celu ukształtowanie elementu),
- optymalizację doboru parametrów procesu nawijania dla osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości [76],
- wpływ procentowej zawartości włókna i osnowy na wytrzymałość laminatu.

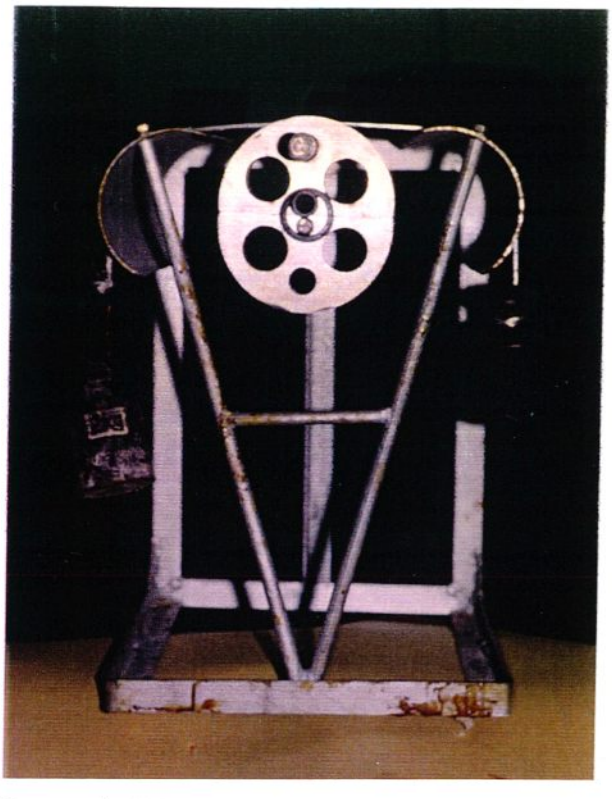
a)



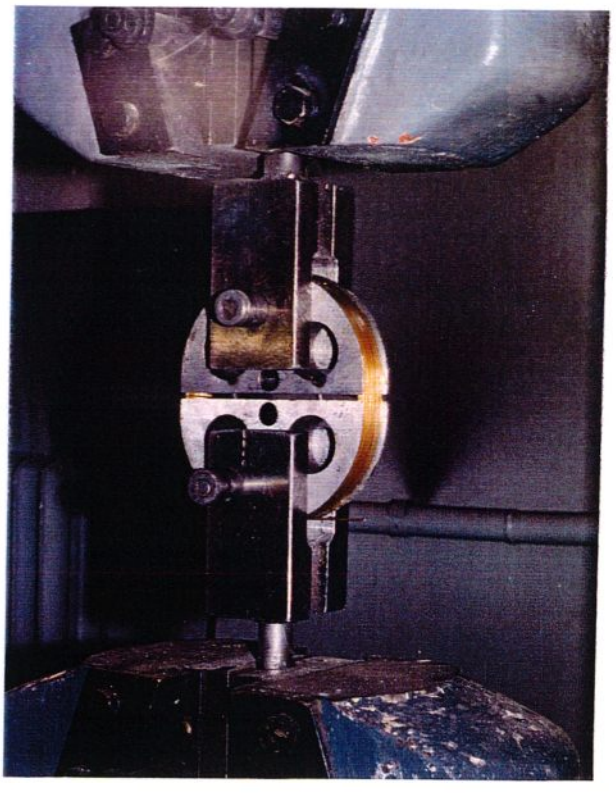
b)



c)



d)



Rysunek 4.1: Widok oprzyrządowania NOL użytego w badaniach wstępnych. *a)* – do próbek płaskich, *b)* – do próbek grubych, *c)* – utwardzanie pod naciągiem, *d)* – próba zrywania pierścienia.

4.1.1 Opis badań

Badania wstępne sprowadzały się głównie do obserwacji wytrzymałości na rozciąganie próbek laminatu nawiniętego na przyrządzie NOL [1, 2, 14, 63, 78]. Na rys. 4.1 pokazano widoki oprzyrządowań NOL używanych w badaniach wstępnych. Na zdjęciu *a*) jest widoczny przyrząd do badania na rozrywanie nawiniętych próbek płaskich (trzy zestawy z ramą do mocowania w tokarce i nawinięcia przesyconego rowingu). Zdjęcie *b*) przedstawia przyrząd do badania na rozrywanie nawiniętych próbek grubych (zestaw z ramą do mocowania w tokarce). Dwie kolejne fotografie przedstawiają utwardzanie kompozytu pod naciągiem *c*) oraz próbę rozciągania nawiniętego kompozytu płaskiego *d*).

4.1.2 Podsumowanie badań wstępnych

Uzyskane wyniki badań wstępnych, podobnie jak w [73] pozwalają stwierdzić, iż pierścienie małej grubości mają wyższą wytrzymałość od pierścieni grubych. Należy podkreślić, iż udział włókna szklanego i syciwa epoksydowego jest taki sam w obu typach pierścieni. Podstawową przyczyną niższych wytrzymałości nawojów grubych (77%) jest nierównomierny naciąg, spowodowany przejściem od warstw wewnętrznych do warstw zewnętrznych oraz występowanie lokalnych naprężeń od skurczów syciwa, co wykazano w [73].

Wykonywano również pierścienie utwardzane w czasie nawijania z małą prędkością. W ten sposób unikano powstawania zmian naciągu w miarę przyrostu średnicy pierścienia. Zauważono wzrost wytrzymałości w tak przygotowanych próbkach, ponieważ w dolnych i górnych warstwach kompozytu uzyskany naciąg był podobny.

Przeprowadzono również próby wytrzymałościowe płaskich pierścieni z przeplotami. Próbki nawijano ręcznie pod możliwie małymi kątami, w celu uzyskania przeplotów. Wykazywały one mniejszą wytrzymałość (o 15%) od próbek nawijanych równomiernie obwodowo. Przyczyną były wcześniej pojawiające się pęknięcia w przeplotach, które łatwo rozprzestrzeniały się. Badano również pierścienie obwodowe z poprzecznie wkładanymi odcinkami rowingów w czasie nawijania. Nie zauważono spadku wytrzymałości w tak skonstruowanych pierścieniach.

4.2 Badania ciśnieniowe nawijanych rur ES

W tym podrozdziale opisano głównie badania rur poddanych działaniu wewnętrznego ciśnienia niszczącego. Szerszy opis badań zamieszczono w [16, 19, 25]. Posłużono się metodą tablicową do: projektowania, analizy nawijania i doboru nawoju dla rur ciśnieniowych. Przygotowano cztery rodzaje rur o różnej strukturze przeplotów. Przy wytwarzaniu rur nawijanych posłużono się metodą opisaną w punkcie 2.3.4, strona 32. Rury obciążano ciśnieniem wewnętrznym (podobnie jak w [41, 45]) według dwóch typów : *SPOSÓB II* – dający dwuosiowy stan naprężenia (obwodowe i wzdłużne) realizowany olejem, *SPOSÓB III* – dający jednoosiowy stan naprężenia (tylko naprężenia obwodowe) realizowany olejem i gumą. *SPOSÓB I* dający naprężenia wzdłużne nie był realizowany.

Podstawowym celem badań jest sprawdzenie wpływu struktury nawiniętego nośnika długowłóknistego (sposobu ułożenia pasm) na wytrzymałość ciśnieniowej rury ES, a tym samym zwrócenie uwagi na znaczenie problemu rozmieszczenia przeplotów oraz średniej długości wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ w badaniach kompozytowych rur nawijanych.

N_r	πd																							a_i
1	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**1/46**
2	0	12	1	13	2	14	3	15	4	16	5	17	6	18	7	19	8	20	9	21	10	22	11	23	2/46
3	0	8	16	1	9	17	2	10	18	3	11	19	4	12	20	5	13	21	6	14	22	7	15	23	3/46
4	0	6	12	18	1	7	13	19	2	8	14	20	3	9	15	21	4	10	16	22	5	11	17	23	4/46
5	**0**	**14**	**5**	**19**	**10**	**1**	**15**	**6**	**20**	**11**	**2**	**16**	**7**	**21**	**12**	**3**	**17**	**8**	**22**	**13**	**4**	**18**	**9**	**23**	**5/46**
6	0	4	8	12	16	20	1	5	9	13	17	21	2	6	10	14	18	22	3	7	11	15	19	23	6/46
7	0	10	20	7	17	4	14	1	11	21	8	18	5	15	2	12	22	9	19	6	16	3	13	23	7/46
8	0	3	6	9	12	15	18	21	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	8/46
9	0	18	13	8	3	21	16	11	6	1	19	14	9	4	22	17	12	7	2	20	15	10	5	23	9/46
10	0	7	14	21	5	12	19	3	10	17	1	8	15	22	6	13	20	4	11	18	2	9	16	23	10/46
11	0	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	23	11/46

Rysunek 4.2: Tablica nawojów dla $n = 23$ i $a_i \in (0, 0.25)$.

4.2.1 Dobór nawoju i wykonanie próbek

Materiały

Rury wykonano używając następujących materiałów krajowych:

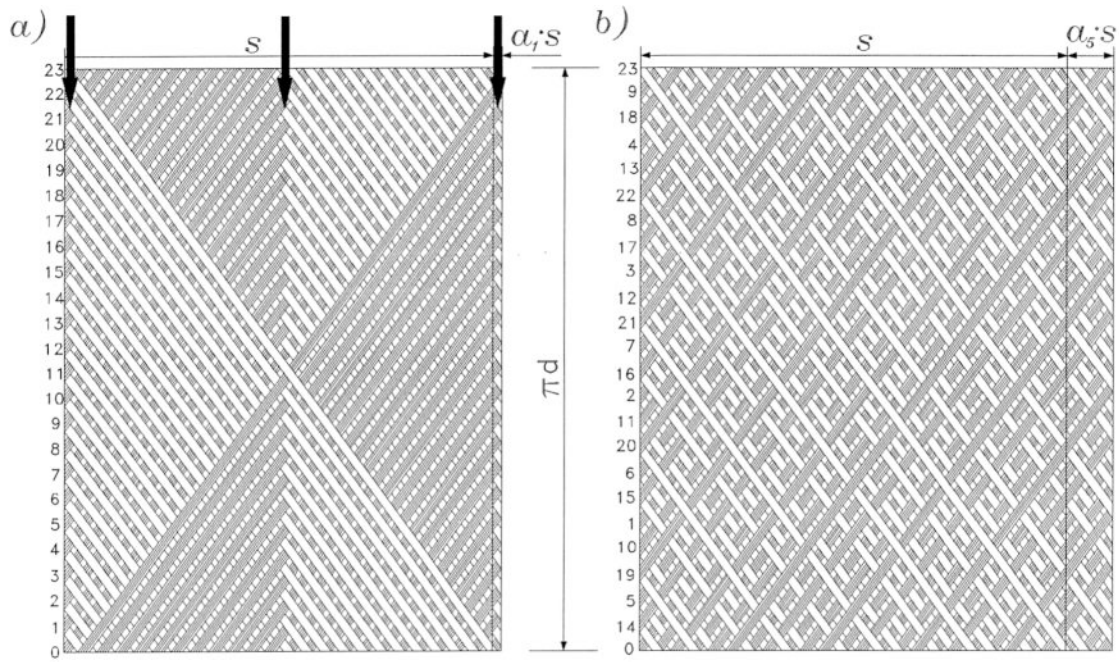
- rowing szklany — szkło typu $E10$, $TEX1200$ $[g/km]$, typ 3005, produkcja — Krośnieńskie Huty Szkła „KROSNO" S.A.
- żywica epoksydowa — EPIDIAN 5, produkcji — Zakładów Chemicznych „SARZYNA",
- utwardzacz — PMDA, produkcji „SOPUR" Bydgoszcz (utwardzacz ten jest odpowiednikiem HT972 firmy „Ciba").

Na rys. 4.2 przedstawiono tablicę nawojów dla liczby wiązek rowingu szklanego w warstwie $n = 23$ oraz współczynników reszty skoku nawijania a_i zawierających się w przedziale $a_i \in (0, 0.25)$, gdzie i jest kolejnym numerem nawoju. Zasadę budowania tablicy i korzystania z niej omówiono w rozdziale 2. Na podstawie tablicy przedstawionej na rys. 4.2 wykonano w początkowym etapie dwa rodzaje rur: N_r1 i N_r5. Dalszy etap obejmował dodatkowo wykonanie i badania rur o strukturach N_r2, 4 i N_r7. Dla rur N_r1 i N_r5 liczba przeplotów i długość reszt skoku nawijania jest odpowiednio równa:

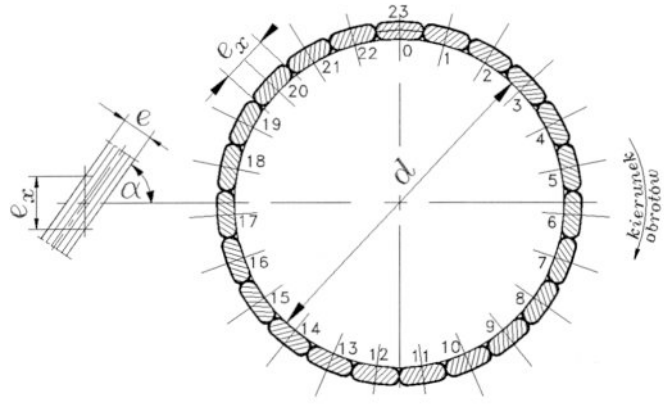
- $N_r1 \rightarrow$ 196 przeplotów, $\quad a_1 \cdot s \approx 2.1mm$,
- $N_r5 \rightarrow$ 978 przeplotów, $\quad a_5 \cdot s \approx 10.5mm$.

Widoki rozwinięć nawojów N_r1 i N_r5 przedstawiono na rys. 4.3. Na rys. 4.4 pokazano rzut czołowy rdzenia z nawojem N_r1. Kolejność wiązek jest zgodna z wierszem w tablicy nawojów – rys. 4.2. Widoczne różnice w strukturze są wynikiem jedynie innych a_i – współczynników reszty skoku nawijania. Pozostałe parametry wymienione poniżej oraz udział włókna szklanego i syciwa pozostają jednakowe dla wszystkich rodzajów rur:

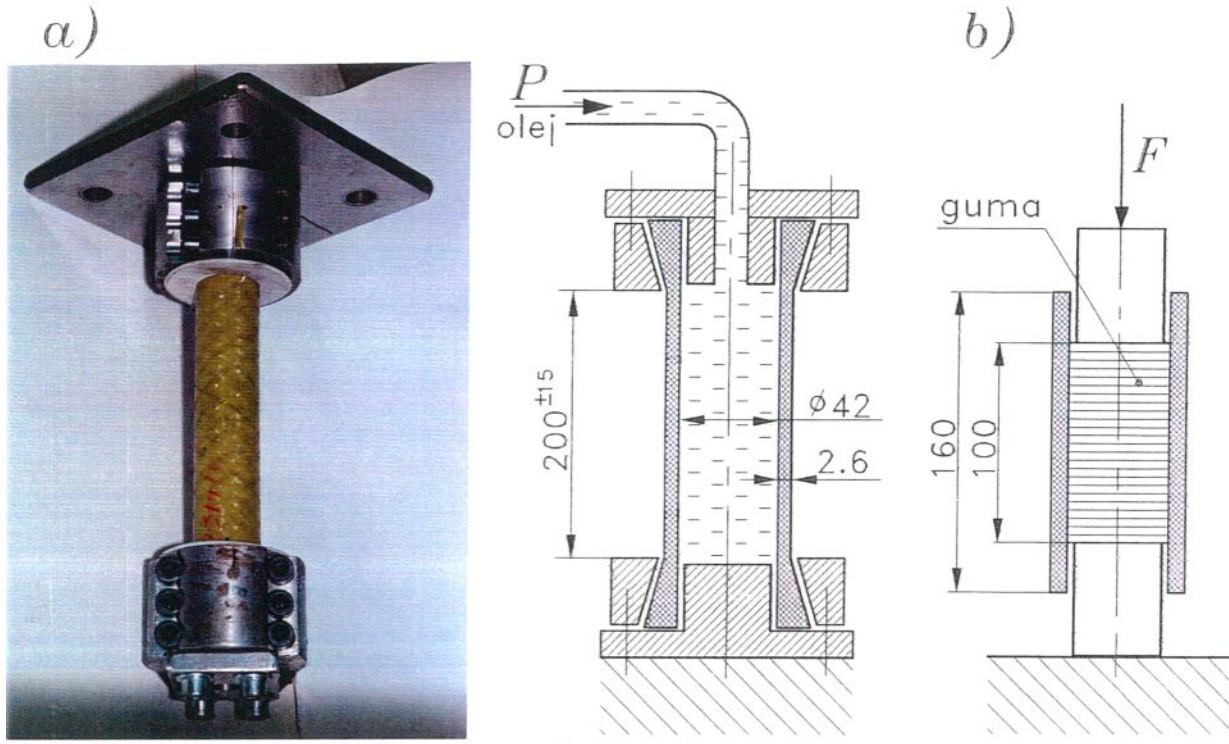
- średnica wewnętrzna rur (średnica rdzenia) — $d = 42mm$,
- liczba wiązek rowingu szklanego w warstwie — $n = 23$,
- kąt nawijania — $\alpha = 54.5^{\circ\pm1}$,
- skok nawijania — $s = 97mm$,
- szerokość wiązki w przekroju poprzecznym rdzenia (rys. 4.4)
  $e_x = \pi d/n = \pi \cdot 42mm/23 \Longrightarrow \quad e_x = 5.7mm$.



Rysunek 4.3: Rozwinięcia nawojów: a) — N_r1, b) — N_r5, wykonanych rur.



Rysunek 4.4: Rdzeń z dwudziestoma trzema wiązkami włókien (przesycone pasma rowingu szklanego) rozmieszczonymi równomiernie na obwodzie według N_r1 oraz widok pojedynczej wiązki o szerokości e i e_x w płaszczyźnie przekroju prostopadłego do osi rdzenia. Wiązka nawinięta pod kątem $\alpha = 54°$.



Rysunek 4.5: Dwa sposoby obciążania próbek rurowych: a) dwuosiowy stan obciążenia realizowany olejem według *SPOSOBU II*, b) jednoosiowy stan obciążenia realizowany gumą według *SPOSOBU III*.

4.2.2 Przebieg badań ciśnieniowych

Poniżej opisano badania rur o strukturach N_r1 i N_r5. Ścianka rur o grubości $g = 2.6mm$ zbudowana jest z sześciu *warstw*. Podobnie jak w opracowaniach [41, 45] rury badano według dwóch sposobów:

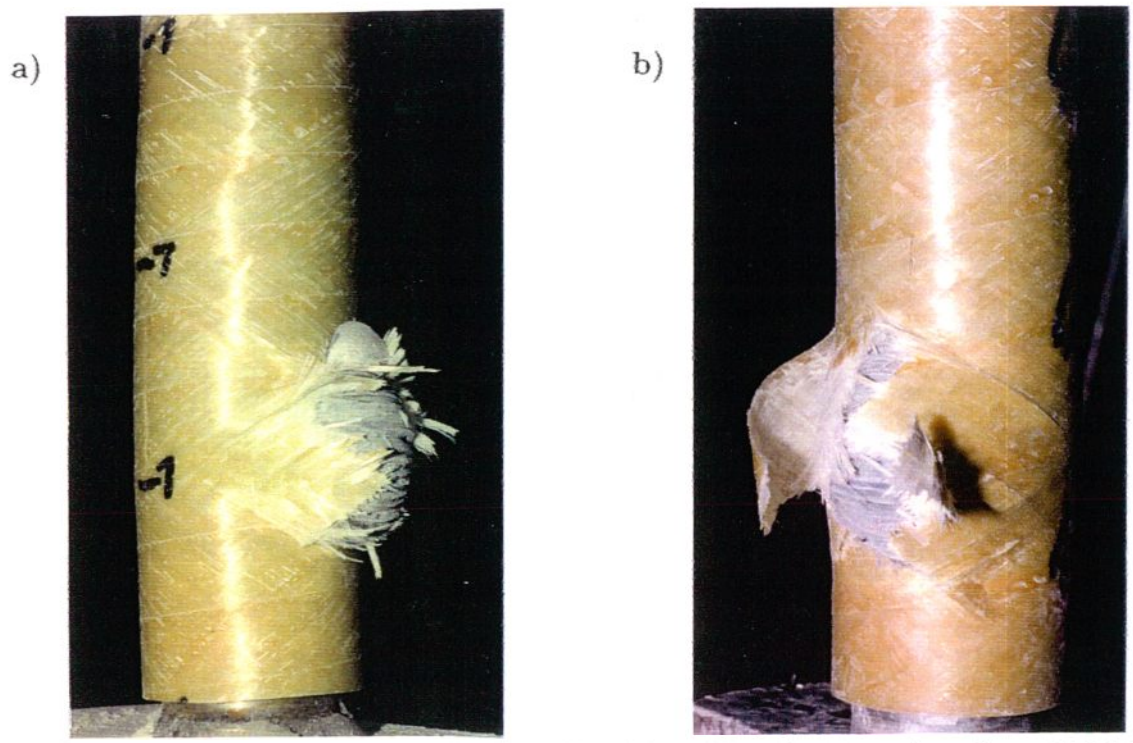
SPOSÓB II — Rury o długościach ok. $30cm$ zaślepiano z obu końców specjalnie przygotowanymi czopami stalowymi, które nie były połączone ze sobą (rys. 4.5a). Przez jeden z czopów wtłaczano olej aż do zniszczenia próbki. W tym przypadku zniszczenie to pojawienie się pęknięć wzdłużnych, przez które następuje wyciek oleju większy niż wydatek pompy. Wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 4.1.

SPOSÓB III — Do rur o długościach $16cm$ wkładano dopasowany stos krążków z gumy o wysokości $10cm$. Następnie z obu końców wkładano stalowe tłoki i całość ściskano osiowo na zrywarce do momentu zniszczenia próbki (rys. 4.5b oraz rys. 4.6). Wyniki w przeliczeniu na ciśnienie jakie wywarła guma na ściankę rury zebrano w tabeli 4.1.

Na rys. 4.6 przedstawiono widok rur w chwili zniszczenia o strukturach N_r1 i N_r5 obciążanych według *SPOSOBU III*. Zamiast gumy używano również niezsieciowanego kauczuku silikonowego, gumy niezwulkanizowanej oraz oleju. Wyniki badań na wymienionych materiałach nie różniły się od użytej taniej gumy zwulkanizowanej. Stos krążków z gumy smarowano talkiem. Testowano również inne smary, takie jak smar silikonowy i mydliny. Badano również opory tarcia stosu gumy o ściankę rury w czasie obciążania. Uznano, iż wpływ smarowania innymi środkami i zjawisko oporów tarcia jest pomijalnie mały, co również potwierdziły uzyskane widoki prążków w badaniach metodą interferometrii holograficznej.

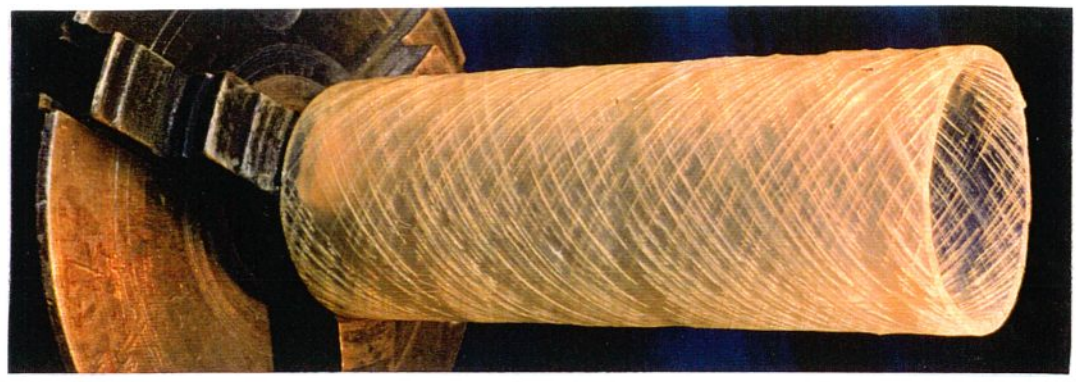
Typ obciążania, struktura próbki	Ciśnienie niszczące w próbach $[MPa]$					
	A	B	C	D	E	średnie
1) *SPOSÓB II*, nawój N_r1						
rura 1	50.0	54.0	52.2	57.0		54.3
2) *SPOSÓB II*, nawój N_r5						
rura 1	62.6	58.2	62.0	65.0		61.9
3) *SPOSÓB III*, nawój N_r1						
rura 1	68.6	68.6	70.7	66.4	67.8	68.4
rura 2	68.6	72.2	65.7	63.5	62.1	66.4
rura 3	64.6	64.4	66.4	66.4	68.6	66.1
rura 4	67.8	74.3	68.6	69.3	65.0	69.0
rura 5 - badana olejem	67.0	59.0	60.0			62.0
4) *SPOSÓB III*, nawój N_r5						
rura 1	67.8	65.7	65.7	67.1	64.2	66.1
rura 2	62.1	65.0	66.4	67.1	64.2	65.0
rura 3	64.2	65.0	65.0	64.2	64.2	64.5

Tablica 4.1: Wyniki badań ciśnieniowych, nawijanych rur ES.

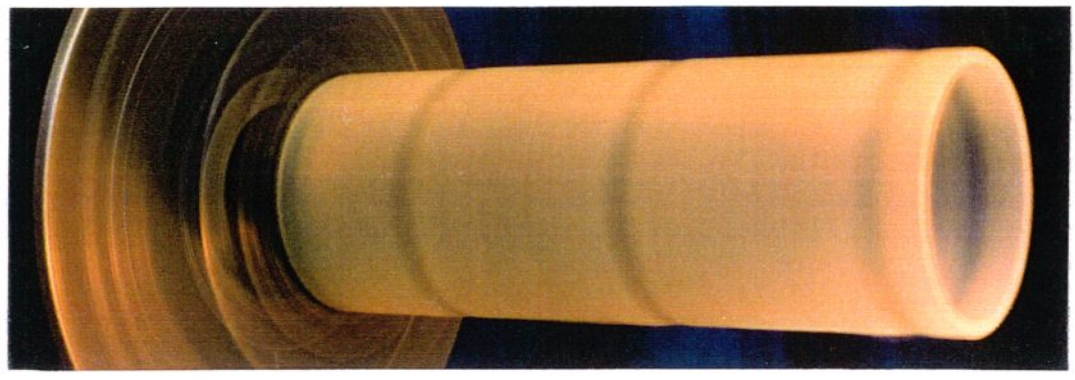


Rysunek 4.6: Widok rur o strukturach: a) — N_r1, b) — N_r5, obciążanych według *SPOSOBU III* w chwili zniszczenia.

a)



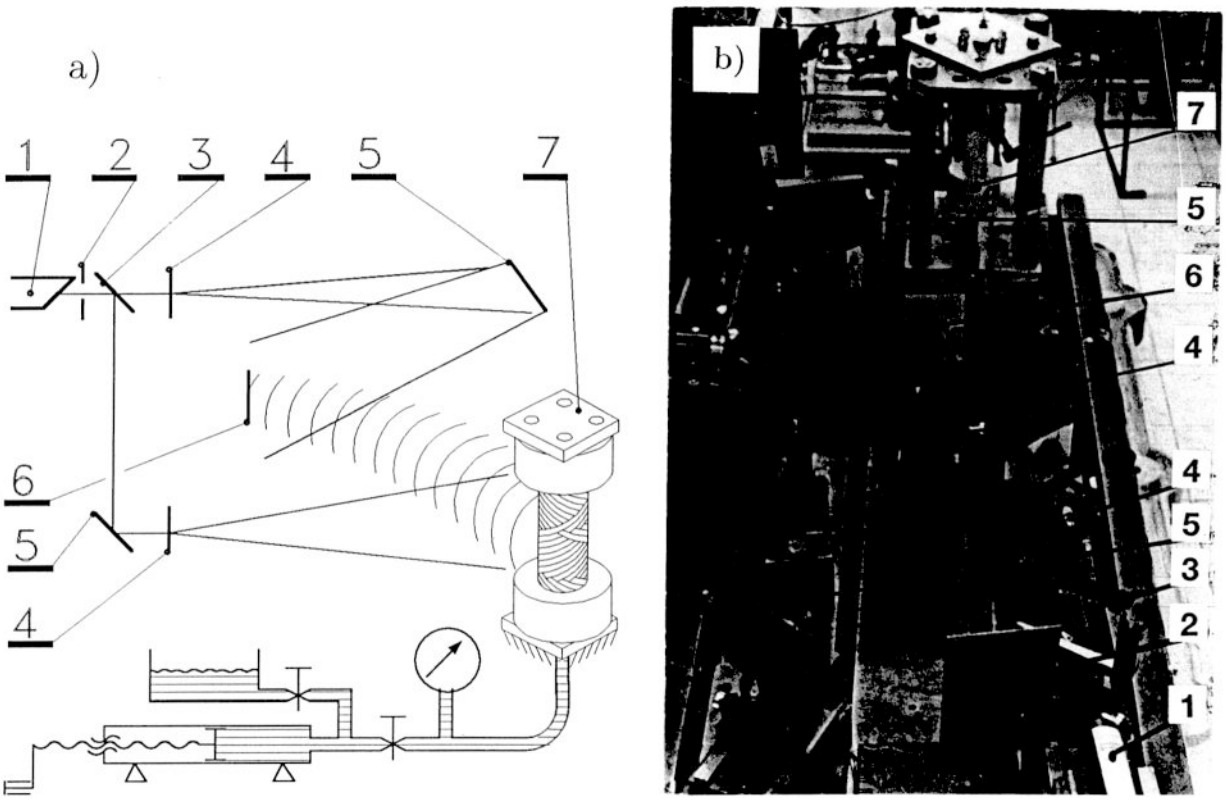
b)



Rysunek 4.7: Widok rury wykonanej z syciwa przezroczystego o strukturze N_r1 po badaniach ciśnieniowych, zamontowanej we wrzecionie tokarki. a) układ statyczny; widoczne pęknięcia w ściance rury, b) układ wirujący – ułatwia odróżnienie obszarów pomiędzy liniami przeplotów bogatych w pęknięcia (jasne) od miejsc niepopękanych.

4.2.3 Obserwacje rury przezroczystej po badaniach ciśnieniowych

Z Instytutu Budownictwa Politechniki Świętokrzyskiej otrzymano odcinek rury po badaniach ciśnieniowych szeroko opisanych w [45]. Rura wykonana jest według nawoju N_r1 z syciwa przezroczystego. Na eksponacie przedstawionym na rys. 4.7 widoczne są licznie występujące pęknięcia. Jednak w obszarach zaznaczonych strzałkami na rys. 4.3a, strona 54 pęknięcia nie występują. W celu lepszej obserwacji tego stanu rurę zamontowano we wrzecionie tokarki i wprowadzono w ruch obrotowy – rys. 4.7. Widać, iż pęknieciа nie przechodzą przez linie zgrupowania przeplotów. Przeploty są swoistą barierą dla pojawiających się pęknięć. Jeśli pęknięcie pojawi się na linii przeplotu w wyniku powstania naprężeń krytycznych jest to początek zniszczenia rury. Taki stan obserwowano w czasie badań opisanych w punkcie 4.2.2. Zniszczenie rur z nawojem N_r1 następowało zawsze na linii zgrupowania przeplotów.



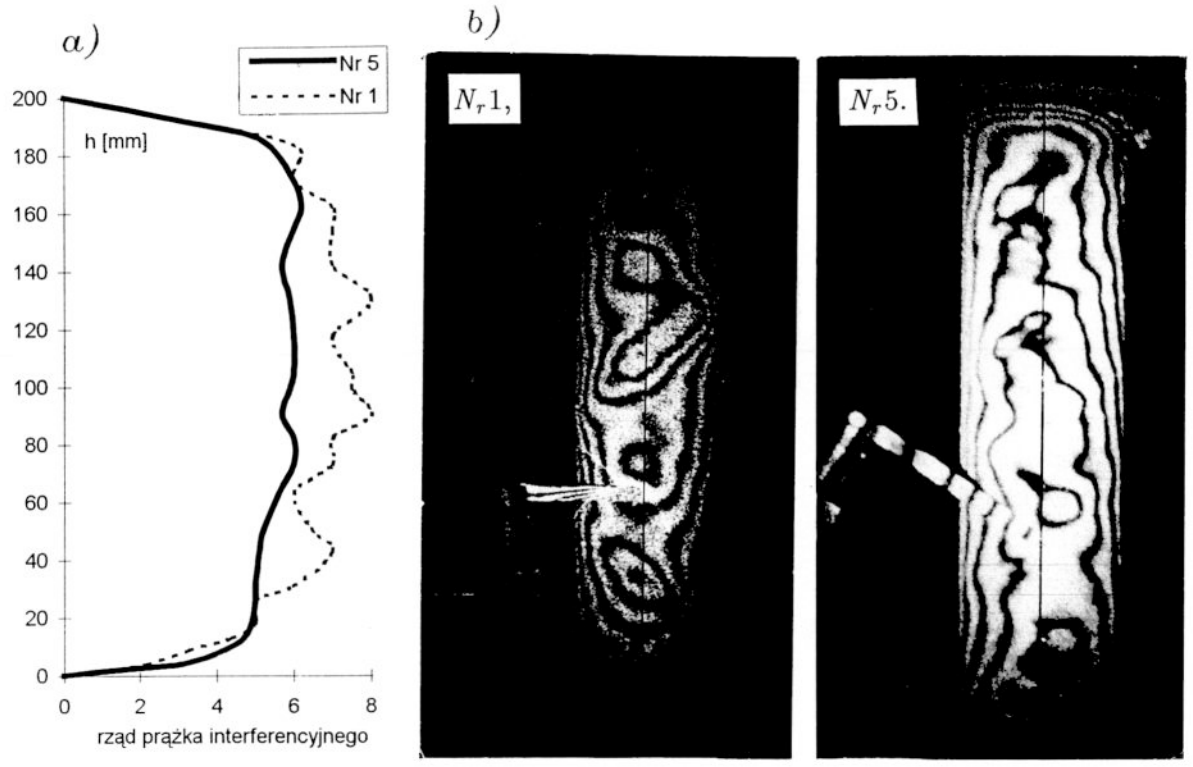
Rysunek 4.8: Schemat oraz widok rzeczywisty układu pomiarowego przemieszczeń rur ES metodą interferometrii holograficznej, 1– laser, 2– migawka, 3– dzielnik wiązki, 4– soczewka, 5– zwierciadło, 6– płyta holograficzna, 7– obiekt badany (rura kompozytowa) z układem zadawania ciśnienia.

4.2.4 Oznaczenie przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej

Przeprowadzono badania ciśnieniowe z pomiarem przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej, które szeroko przedstawiono w [25]. Metodę interferometrii holograficznej krótko scharakteryzowano we wstępie (rozdział 1) oraz szerzej w [11].

Celem przeprowadzonych badań jest analiza wpływu sposobu ułożenia nawiniętego nośnika długowłóknistego na strukturę przemieszczeń ścianki ciśnieniowej rury ES, a także zwrócenie uwagi na problem rozmieszczenia przeplotów w rurach nawijanych oraz jego wpływ na właściwości mechaniczme.

Widoki rozwinięć nawojów N_r1 i N_r5 przedstawiono na rys. 4.3, strona 54. Inne parametry pozostały bez zmian: wymiary, liczba warstw = 4, kąt nawijania $\alpha = 54.5^{\circ\pm1}$ oraz udział włókna szklanego (80% wag.) i syciwa są jednakowe dla obydwu rodzajów rur. Badane rury metodą interferometrii holograficznej charakteryzowały się cieńszą ścianką w porównaniu do rur przedstawionych w punkcie 4.2.1 (liczba warstw = 4). Na rys. 4.8 przedstawiono schemat oraz widok rzeczywisty układu pomiarowego przemieszczeń rur ES metodą interferometrii holograficznej. Pomiary prowadzono dla różnych wartości ciśnienia panującego wewnątrz rur. Ciśnienia te wynosiły: 50, 100 i 150 *barów*. Na rys. 4.9b przedstawiono przykładowe interferogramy zarejestrowane dla obu badanych rur techniką podwójnej ekspozycji. Przedstawiony rozkład prążków uzyskano w przypadku, gdy ciśnienie wstępne wynosiło $P_w = 50$ *barów*, a przyrost ciśnienia $\Delta P = 1$ *bar*. Na podstawie



Rysunek 4.9: Wyniki badań metodą interferometrii holograficznej. a) – wykresy przemieszczeń ścianek rur z nawojem N_r1 i N_r5 dla ciśnienia 50 *barów* z przyrostem 1 *bar* w funkcji długości rury. b) – widoki uzyskanych interferogramów holograficznych dla rur z nawojem N_r1 i N_r5 przy ciśnieniu 50 *barów* z przyrostem 1 *bar*.

zarejestrowanych interferogramów wykonano wykresy przemieszczeń w kierunku normalnym do powierzchni badanych rur. Przykładowe wykresy przemieszczeń przedstawia rys. 4.9a. Geometria układu pomiarowego była tak dobrana, że kąt zawarty pomiędzy dwusieczną wyznaczającą kierunek obserwowanych przemieszczeń i płytą holograficzną nie przekraczał 10°.

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że struktura przemieszczenia punktów leżących na tworzącej rury N_r5 jest bardziej równomierna niż w przypadku rury N_r1. Również wartości przemieszczeń ścianki rury N_r5 są niższe o ok. 20%. Dla obrazu przemieszczeń zarejestrowanego w przypadku rury N_r1 charakterystyczne jest, że w środkowej części odcinka pomiarowego (ok. 2/3 długości badanych rur) mniejsze wartości przemieszczeń występują w miejscach gdzie następuje zgrupowanie przeplotów (zaznaczone strzałkami na rys. 4.3a), strona 54). Przemieszczenia te zmieniają się wzdłuż osi rury, a różnice ich wartości wynoszą nawet 25%. Można na tej podstawie twierdzić, że również właściwości mechaniczne ścianek tej rury zmieniają się wzdłuż jej osi.

W przypadku gdy ciśnienie panujące wewnątrz badanych rur wynosiło 5.4 *barów* uzyskane wartości przemieszczeń (dla przyrostu ciśnienia $\Delta P = 1$ *bar*) nie różniły się znacząco od analogicznych wartości uzyskanych dla ciśnienia wstępnego 50 *barów*. Dopiero przy ciśnieniu 150 *barów* zarejestrowano wzrost przemieszczeń o ok. 15%. Podobne interferogramy holograficzne do przedstawionych na rys. 4.9 uzyskano dla rur obciążanych według *SPOSOBU III* (przy użyciu gumy).

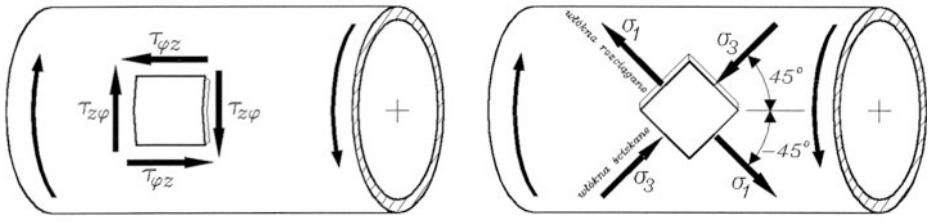
Podsumowując – przeprowadzone badania wytrzymałościowe z pomiarem przemieszczeń ścianki kompozytowych elementów rurowych metodą interferometrii holograficznej pozwalają stwierdzić, iż liczba i rozmieszczenie przeplotów ma wpływ na nierównomierność przemieszczeń oraz końcową wytrzymałość kompozytowej rury ciśnieniowej.

Rozkład przemieszczeń zarejestrowany dla nawoju N_r1 wskazuje na występowanie miejscowych przewężeń na długości rury. Rozmieszczenie przewężeń jest zgodne z występowaniem obwodowego zgrupowania przeplotów (rys. 4.3a, strona 54). Rury z nawojem N_r5 odkształcają się równomiernie, co jest widoczne przy porównaniu krzywych z rys. 4.9a. Nieznaczne odchylenia od prostoliniowości wykresu dla rury N_r5 wynikają z faktu, iż badany materiał kompozytowy sam w sobie jest niejednorodny. Wyraźniejsze wykresy można uzyskać dla rur wykonanych z rowingu składającego się z mniejszej liczby elementarnych włókien szklanych. Wyniki z przeprowadzonych badań metodą interferometrii holograficznej korelują z miejscem oraz wyglądem pęknięć badanych rur, a także z wynikami badań kompozytowych butli ciśnieniowych przedstawionych w punkcie 4.4.

4.2.5 Podsumowanie badań ciśnieniowych rur

Przeprowadzone badania ciśnieniowe pozwalają stwierdzić, iż liczba i rozmieszczenie przeplotów ma wpływ na wytrzymałość rury ciśnieniowej.

- Dobór optymalnego nawoju ma bardzo duże znaczenie dla wytrzymałości mechanicznej nawijanego elementu rurowego. Dowodem tej tezy są zwłaszcza wyniki badań ciśnieniowych według *SPOSOBU II*, przedstawione w tabeli 4.1, strona 56. Nawój N_r5 ma większą wytrzymałość od nawoju N_r1 o około 20%.
- Powyższe stwierdzenie potwierdzają również przeprowadzone badania przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej.
- Przypuszczano, że powyższe uda się również udowodnić badaniami ciśnieniowymi „gumą" według *SPOSOBU III*, punkt 4.2.2. Jednak wyniki badań przedstawione w tabeli 4.1, strona 56 dla nawojów N_r1 i N_r5 są podobne i mieszczą się w granicy błędu maszyny wytrzymałościowej. Jednak hologramy uzyskane dla rur obciążanych według *SPOSOBU III* (przy użyciu gumy) wskazują na odmienne sposoby odkształcania się nawojów.
- Na podstawie wyglądu zniszczonych „gumą" próbek według *SPOSOBU III* można dopatrzeć się różnic jakościowych w pęknięciach rur próbnych:
  - Rury z nawojem N_r1 pękają punktowo na linii obwodowej krzyżowania się wiązek (rys. 4.3, strona 54 i rys. 4.6, strona 56).
  - Natomiast rury z nawojem N_r5 pękają na większej powierzchni. Końcowej fazie pękania próbek N_r5 dodatkowo towarzyszy odwarstwienie i oddzielene wierzchniej warstwy rury kompozytowej.



Rysunek 4.10: Płaski stan naprężeń oraz stan naprężeń w kierunkach głównych elementu rury skręcanej.

4.3 Badania rur ES na skręcanie

Posłużono się metodą tablicową do: projektowania, analizy nawijania i doboru nawoju dla rury skręcanej. Specjalnie przygotowane rury o kontrolowanej strukturze przeplotów były skręcane na urządzeniu pozwalającym rejestrować moment skręcający i kąt skręcenia oraz EA. Obserwacje prowadzone dla kilku rodzajów struktur rur kompozytowych wykonanych metodą nawijania pozwalają stwierdzić, iż liczba i rozmieszczenie przeplotów ma wpływ na wytrzymałość elementu. Wyniki pomiarów i obserwacji EA także wskazują na różnice w zachowaniu się rur kompozytowych w czasie obciążania. Wyniki badań rur ES na skręcanie przedstawiono także w pracach [17, 18, 28]. Rury użyte do badań projektowano dokładnie według schematu przedstawionego w punkcie 2.2.2, strona 22 oraz wykonano na nawijarce łańcuchowej, według zasad opisanych w punkcie 4.3.3. Badania przedstawione w niniejszym podrozdziale miały na celu:

- sprawdzenie wpływu struktury nawiniętego nośnika długowłóknistego (średniej długości wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ oraz rozmieszczenia przeplotów) na wytrzymałość skręcanej rury ES,
- potwierdzenie zjawisk zachodzących w obciążanym kompozycie na podstawie EA,
- przedstawienie kolejnego potwierdzenia praktyczności metody tablicowej do opisu struktur nawijanych.

4.3.1 Analiza stanu naprężenia rur skręcanych

Proces zniszczenia materiału wiąże się z przekroczeniem sił kohezji poszczególnych składników kompozytu lub sił adhezji pomiędzy składnikami. Następstwem tego jest utrata spójności materiału i pojawianie się pęknieć w samych składnikach lub na ich połączeniu. Proces inicjacji i charakter pęknięć zależy w głównej mierze od stanu naprężeń. Przypuszczalny proces inicjacji i propagacji pęknięć w badanym materiale podano we wstępie – rozdział 1. Ze względu na małą grubość ścianki w stosunku do średnicy można z niewielkim błędem przyjąć stały rozkład naprężeń wzdłuż promienia rury. Uproszczenie to pozwala przyjąć, że w rurze panuje płaski stan naprężenia. Na rys. 4.10 przedstawiono składowe stanu naprężenia w elemencie ścianki rury na kierunkach ekstremalnych naprężeń głównych. Skręcaniu towarzyszy stan naprężeń określony zależnościami:

$$\tau_{extr} = \tau_{\phi z} = \tau_{z\phi}, \qquad \sigma_1 = \tau_{extr}, \qquad \sigma_2 = 0, \qquad \sigma_3 = -\tau_{extr}. \tag{4.1}$$

Próbki zaprojektowano w ten sposób, aby kierunek ułożenia włókien pokrył się z kierunkiem działania naprężeń głównych. Włókna ułożone pod kątem 45° do osi rury są wzdłużnie ściskane, a pod kątem −45° do osi rury są wzdłużnie rozciągane. W opracowaniu [56] szczegółowo przedstawiono przypadek wytrzymałości rury kompozytowej o zbrojeniu ukośnym poddanej skręcaniu.

4.3.2 Parametry rur próbnych

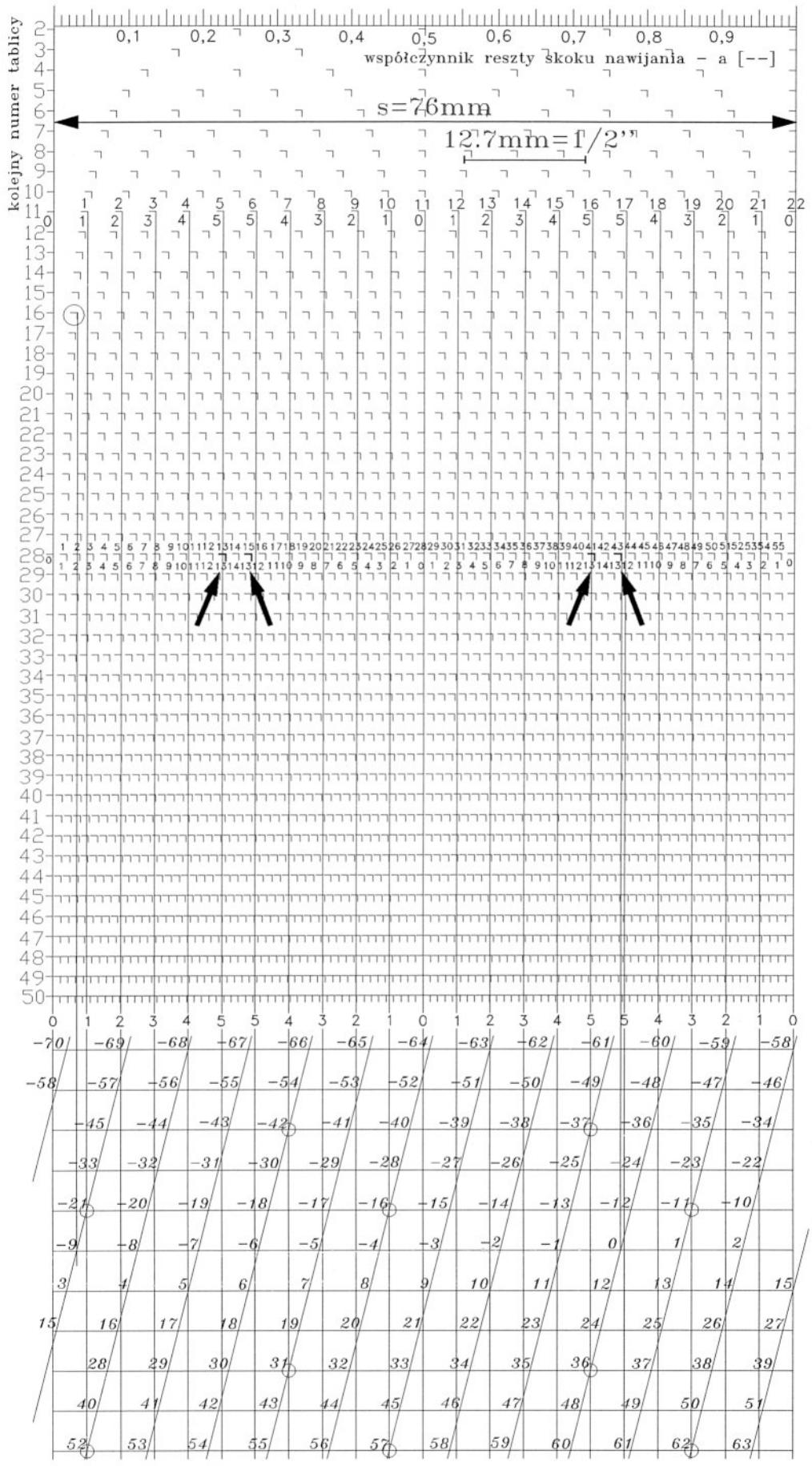
- liczba warstw — 7,
- liczba wiązek rowingu szklanego w warstwie — $n = 11$,
- kąt nawijania — $\alpha = 45^{\circ\pm1}$,
- skok nawijania — $s \approx 78mm$,
- średnica rdzenia — $d \approx 24mm$,
- szerokość wiązki w przekroju poprzecznym rdzenia
  $e_x = \pi d/n = \pi \cdot 24mm/11 \Longrightarrow \quad e_x = 6.8mm$,

Materiały użyte do wykonania rur skęcanych opisano w punkcie 4.2.1, strona 53.

4.3.3 Dobór nastaw nawijarki

Na nawijarce łańcuchowej wykonano pięć rodzajów rur, które różniły się jedynie sposobem ułożenia pasm rowingu (rys. 2.7, strona 26). Szczegółowy opis stanowiska oraz technologii wykonywania rur przedstawiono w [14]. Opis nastaw nawijarek zawarto w punkcie 2.3.4, strona 32. Doboru nastaw nawijarki łańcuchowej przeprowadzono następująco:

- Kąt nawijania uzyskano przez dobór, metodą prób i błędów, liczby zębów łańcuchowego koła napędowego oraz dobór przełożenia pomiędzy kołem łańcuchowym i wrzecionem nawijarki [75, 77, 78].
- Wykorzystując graficzne zestawienie tablic nawojów, wykonane przy pomocy oprogramowania komputerowego *AutoCAD* [90], przeprowadzono analizę nawijania. Zestawienie tablic nawojów przedstawiono na rys. 2.14, strona 33. Wykorzystanie zestawienia do omawianego przykładu przedstawiono na rys. 4.11.
- Ze względu na długość rdzenia przyjęto optymalną liczbę ogniw łańcucha rolkowego (do przesuwu suportu nawijarki) i oznaczono ją cyfrą „0" , po czym wykonano nawój próbny.
- Dokonano rozpoznania struktury uzyskanego nawoju i odszukano go w zestawieniu tablic nawojów. Jest to nawój 28/13. Nawój 13 z tablicy 28 należy do grupy (13,15,41,43). Nawoje z tej grupy wskazano strzałkami na rys. 4.11.
- W celu dokładniejszego określenia nawoju w zestawieniu rys. 4.11 wykonano następny nawój próbny. Najłatwiejsze do rozpoznania są nawoje z małymi współczynnikami reszty skoku nawijania. Uwzględniając podziałkę wykonania zestawienia (skok nawijania s = 76 *cm*) oraz wymiar ogniw łańcucha (12.7 *mm*) oszacowano, iż odjęcie (−9) ogniw umożliwi wykonanie nawoju z małym współczynnikiem a. Skrócenie łańcucha o jedno ogniwo (1/2") powoduje przesunięcie koła napinającego o 1/4"= 6.35 *mm*. Jest to odległość pomiędzy skośnymi liniami w dolnej części wykresu w przyjętej podziałce. Przecięcie skośnej linii z linią poziomą i zrzutowanie punktu przecięcia na górną część wykresu wskazuje nawój możliwy do wykonania.



Rysunek 4.11: Zestawienie tablic nawojów ze szkicem pomocniczym wyznaczania liczby ogniw łańcucha.

nawój	współczynnik reszty skoku nawijania [—]	reszta skoku nawijania $[mm]$	liczba przeplotów [—]	średnia długość wiązki $\bar{l}$ $[e]$	średnia długość wiązki $[mm]$	średnia średnica rury $[mm]$	średni udział wagowy włókna szklanego [%]
N_r1	a_1=1/22	$a_1 s \approx$ 3.55	42	5.81	39.51	28.5	81.77
N_r2	a_2=2/22	$a_2 s \approx$ 7.09	122	2.0	13.6	29.0	76.56
N_r3	a_3=3/22	$a_3 s \approx$ 10.36	114	2.14	14.55	28.6	82.12
N_r4	a_4=4/22	$a_4 s \approx$ 14.18	98	2.49	16.93	28.9	78.18
N_r5	a_5=5/22	$a_5 s \approx$ 17.72	72	3.39	23.04	28.5	82.32

Tablica 4.2: Zestawienie różnic pomiędzy rurami przeznaczonymi do badań na skręcanie.

- Dokonano rozpoznania struktury uzyskanego nawoju i odszukano go w zestawieniu tablic nawojów. Jest to nawój 16/1.
- Linię łączącą ogniwa 0 i −9 podzielono na 9 równych odcinków obrazujących kolejne ogniwa łańcucha. Oceniono, iż pierwszym nawojem próbnym może być nawój 28/43 lub 28/15 (z uwagi na symetrię zestawienia tablic względem współczynnika $a = 0.5$). Zdecydowano się na nawój 28/43. Dokładny wybór można uzyskać zliczając pełne przedziały skoków na rdzeniu. Po długości reszty skoku nawijania jaka została można oszacować z jakiego przedziału jest współczynnik a.
- Przedłużono linię 0 , −9 do ogniw −45 i 63, uwzględniając podział na ogniwa w przyjętej skali.
- Wykonano dodatkowo dwa nawoje próbne dla −42 oraz 62 ogniwa łańcucha, które rozpoznano jako 11/4 oraz 11/3.
- Wykorzystując komendę ARAY w oprogramowaniu *AutoCAD* ze zmierzonymi długościami ogniw, wykreślono sieć obrazującą pełny zestaw możliwych do wykonania nawojów w przedziale (−45 , 63) ogniw (dolna część zestawienia z rys. 4.11).
- Rury próbne wykonano dla następujących liczb ogniw łańcucha:

  N_r1 : 57 ogniw,
  N_r2 : 10 ogniw,
  N_r3 : −11 ogniw,
  N_r4 : 31 ogniw,
  N_r5 : −37 ogniw.

Pozostałe parametry rur zebrano w tabeli 4.2. Zdjęcie wykonanych nawojów rur skręcanych przedstawiono na rys. 4.12. Wygląd wykonanych nawojów jest zgodny z rys. 2.7, strona 26.

Prowadzono próby zamiany łańcucha nawijarki na elastyczny pas pędny w celu bezstopniowej regulacji długości ruchu suportu. Próby nawijania z małogabarytowym modelem wypadły pomyślnie, jednak w dużej maszynie występował nieznaczny poślizg pasa, który uniemożliwiał wykonanie planowanego nawoju.

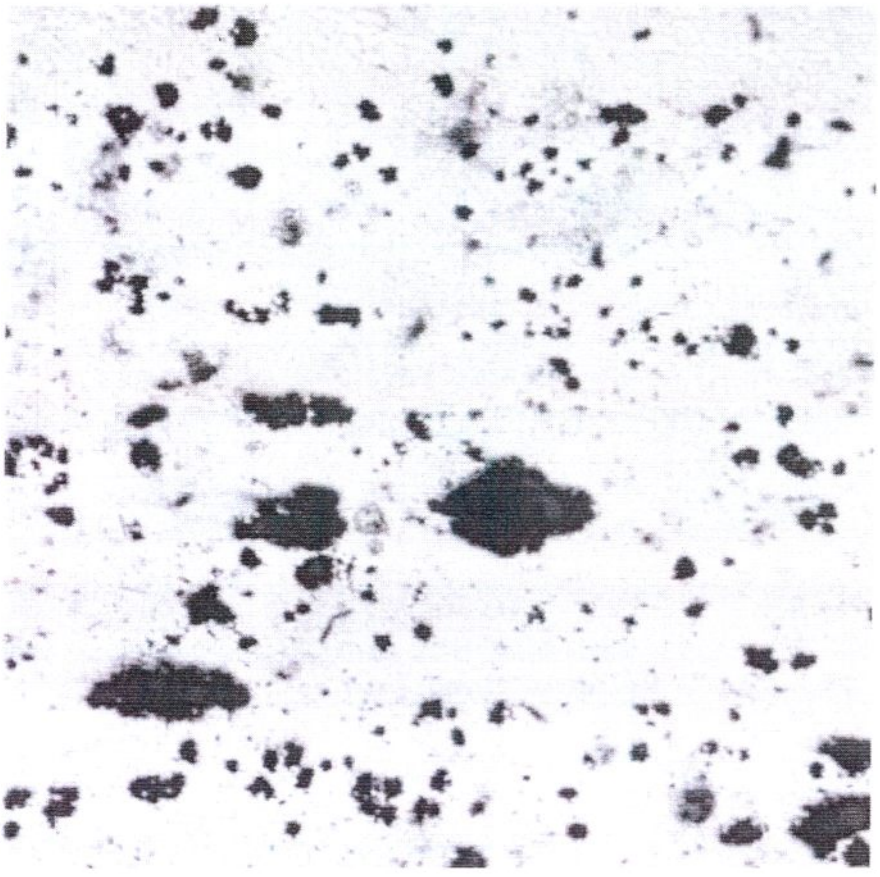
Rysunek 4.12: Zdjęcie wykonanych nawojów rur skęcanych.

4.3.4 Analiza jakości uzyskanego kompozytu

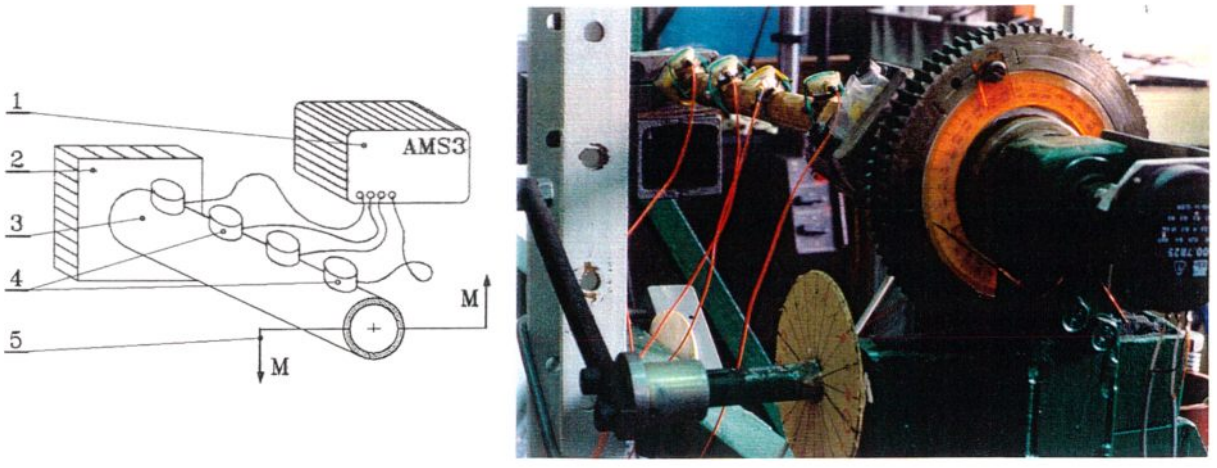
Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe badanego materiału wykazują bardzo duży udział pustek (pęcherzy powietrza i por). Analizę prowadzono przy użyciu sprzętu komputerowego. Wyniki pomiarów we wszystkich rodzajach struktur są podobne i wynoszą $V_p = 10\%$. Jest to wartość klasyfikująca badany materiał jako bardzo niskiej jakości [28]. Na rys. 4.13 pokazano widok materiału z licznymi defektami w postaci ciemnych plam (pęcherze powietrza). Podobne widoki zgładów obserwowano w pozostałych badanych elementach (rurach ciśnieniowych i butlach).

4.3.5 Stanowisko badawcze

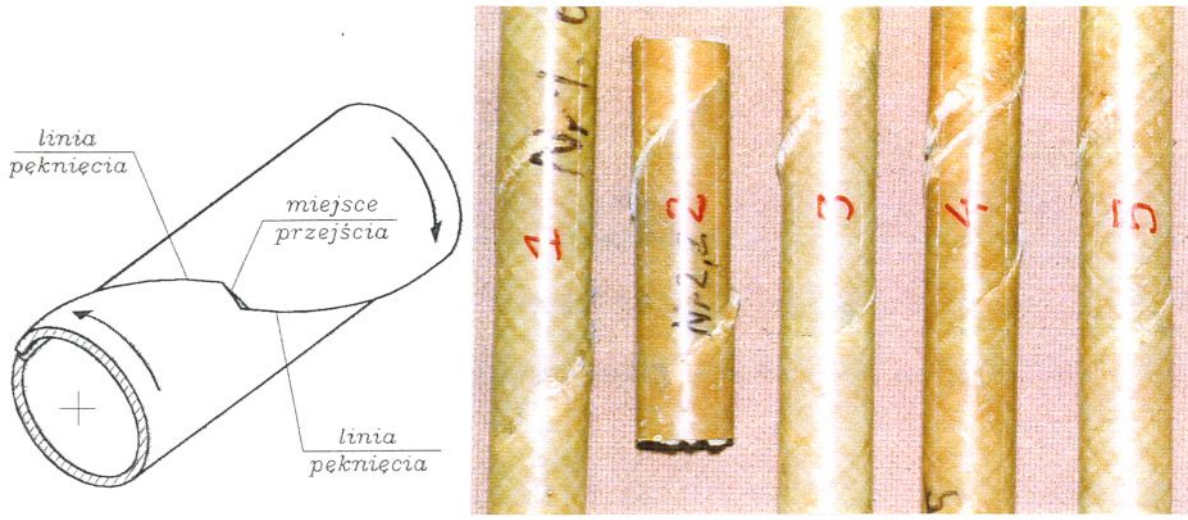
Badania wykonywano na urządzeniu skręcającym własnej konstrukcji (rys. 4.14). Stały napęd ręczny ślimaka przekładni ślimakowej utrzymywany był poprzez rytm mechanizmu zegarowego. Do ślimacznicy przymocowano kątomierze (zwykły podziałkowy oraz potencjometr przekazujący przyrost napięcia ze wzrostem kąta skręcenia ślimacznicy) i momentomierz (rura stalowa, gatunek 45, $\phi 40mm$, $g = 3mm$ z naklejonymi tensometrami). Na końcu momentomierza znajdował się uchwyt sześciokątny do mocowania próbki rurowej. Drugi koniec próbki był utwierdzony swobodnie, również w uchwycie sześciokątnym. Do badanej rury kompozytowej o długości $330mm$ (rys. 4.16) mocowano czujniki akustyczne w odległości co $100mm$. W czasie badań rejestrowano kąt skręcenia, moment skręcający oraz EA na urządzeniu AMS3 opisanym w punkcie 3.3, strona 42. Urządzenie to pozwala rejestrować dane ilościowe powstających fal akustycznych na czterech zsynchronizowanych kanałach oraz przebiegi czasowe fal, jednak tylko z pierwszego kanału. Oprogramowanie zestawu akustycznego umożliwia przedstawianie wyników w formie różnych wykresów. Jako kryterium zniszczenia próbki przyjęto pęknięcie o gwałtownym charakterze, którego kierunek był zgodny z kierunkiem włókien rozciąganych (rys. 4.15).



Rysunek 4.13: Widok mikrostruktury ścianki badanych rur ES – powiększenie 60 razy. Widoczny materiał kompozytowy z licznymi pustkami, defektami w postaci ciemnych plam.



Rysunek 4.14: Zdjęcie stanowiska do badań rur na skręcania oraz schemat skręcania rury ES: 1 – aparatura akustyczna, 2 – utwierdzenie, 3 – badana rura, 4 – czujniki akustyczne, 5 – moment skręcający.



Rysunek 4.15: Szkic próbki po zniszczeniu oraz zdjęcie pięciu badanych *struktur*.

Rysunek 4.16: Widok kompozytowaj próbki rurowej po badaniach na skręcanie.

4.3.6 Przebieg badań

Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów w funkcji czasu, obciążania i kąta skręcenia. W górnej części wykresów wpisano współrzędne oraz jednostki. W opisie wykresów numer wykresu (zamieszczony w górnym, prawym rogu) podano w nawiasach ( ).

W pamięci komputera próbki oznaczono dwoma cyframi, np. 5–4, co oznacza próbkę rurową z nawojem N_r5 i czwartą z kolei. To oznaczenie jest widoczne w dolnym, prawym rogu rysunków. W dolnym lewym rogu rysunków widać przedział czasowy, dla którego wykonano wykres (godzina oraz numer zdarzenia). Po środku zamieszczony jest numer ostatniego zdarzenia akustycznego w pliku.

Prędkość kąta skręcania swobodnego końca rury była $0.2°/s$, co odpowiadało przyrostom momentu skręcającego w zakresie $2.8 - 3.2Nm/s$.

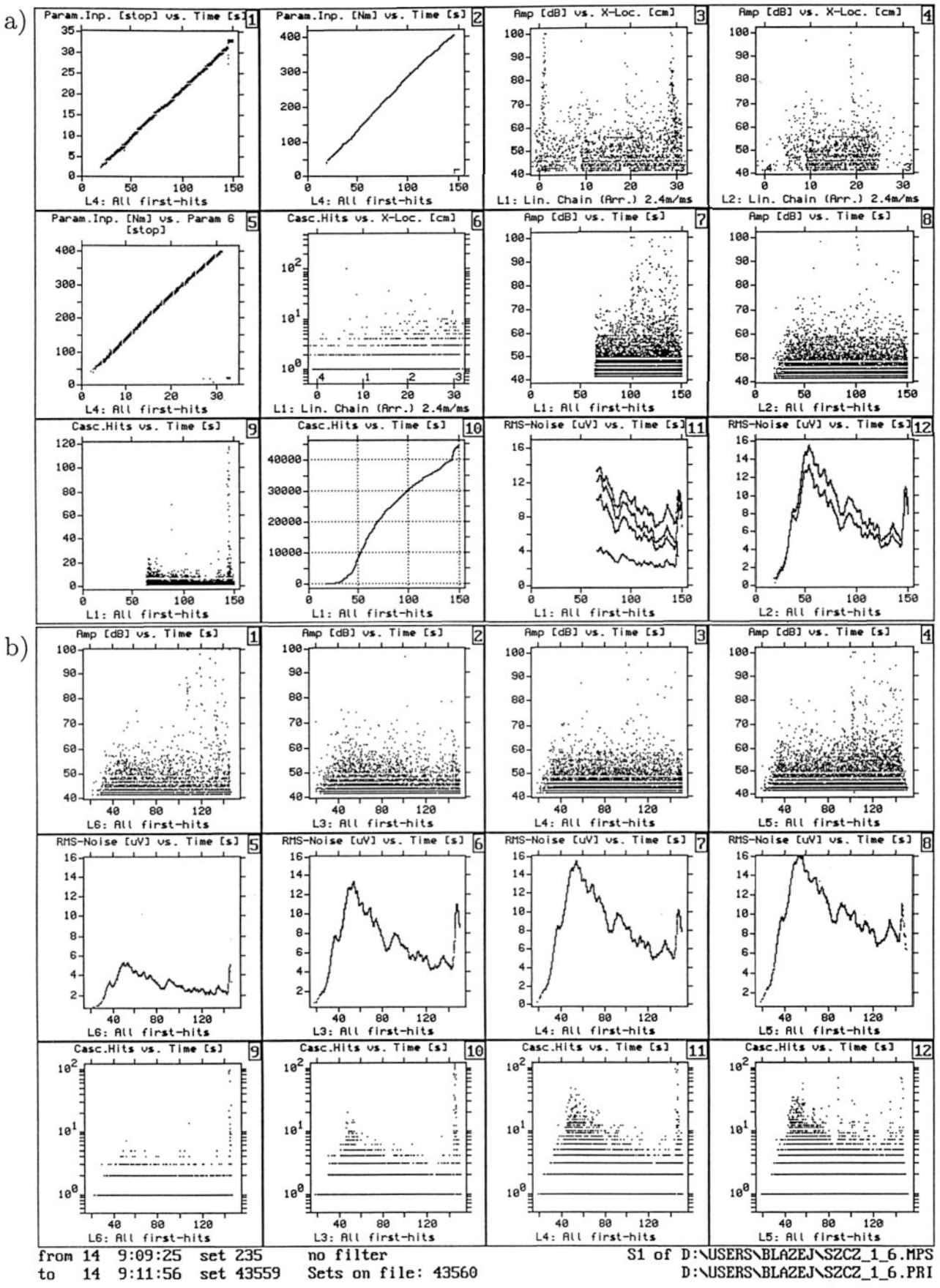
Na rysunkach od 4.17 do 4.21 przedstawiono zestawy wykresów a) i b), w których kolejne obrazują:

a(1) – kąt skręcenia w czasie trwania próby,
a(2) – moment skręcający w czasie trwania próby,
a(3) – rozkład amplitudy na długości próbki,
a(4) – rozkład amplitudy na długości próbki z nieaktywnymi czujnikami skrajnymi 3 i 4, w celu odcięcia zakłóceń pochodzących od uchwytów,
a(5) – kąt skręcenia w funkcji momentu skręcającego,
a(6) – rozkład tzw. hitów na długości próbki,
a(7) – rozkład amplitud w czasie,

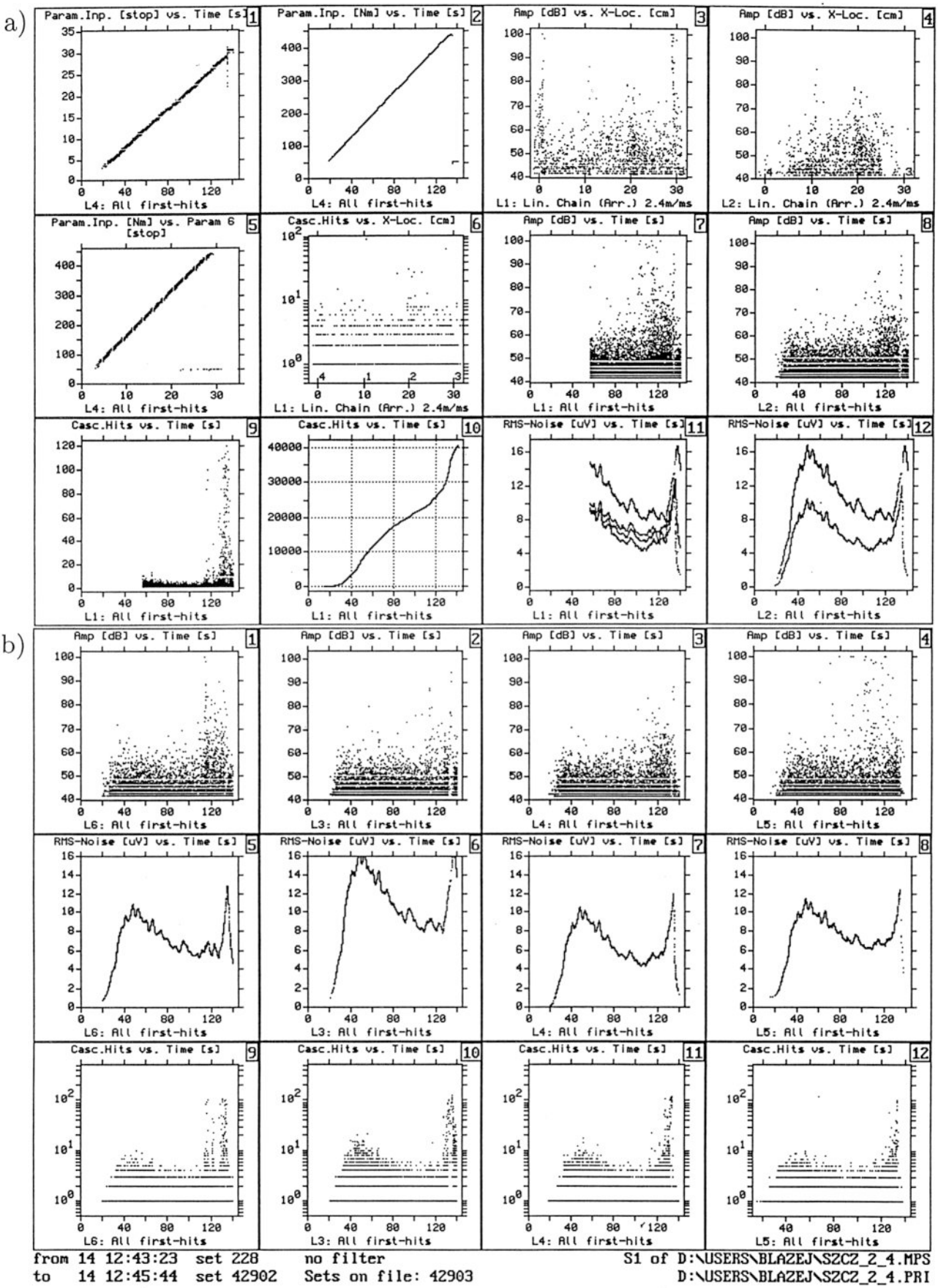
a(8) – rozkład amplitud w czasie z nieaktywnymi czujnikami skrajnymi 3 i 4,
a(9) – rozkład hitów w czasie,
a(10) – narastająca liczba kaskady hitów w czasie,
a(11) – RMS (średnia wartość skuteczna hitów) w czasie trwania próby dla wszystkich czterech kanałów,
a(12) – RMS w czasie dla kanałów 1 i 2, w celu uniknięcia zakłóceń spowodowanych uchwytami,
b(1), b(2), b(3), i b(4) – rozkład amplitudy hitów w czasie trwania próby,dla czujników 1, 2, 3, i 4,
b(5), b(6), b(7), i b(8) – RMS w czasie trwania próby dla czujników 1, 2, 3, i 4,
b(9), b(10), b(11), i b(12) – liczba hitów w czasie dla czujników 1, 2, 3, i 4.

4.3.7 Analiza obrazu EA i wytrzymałości próbek

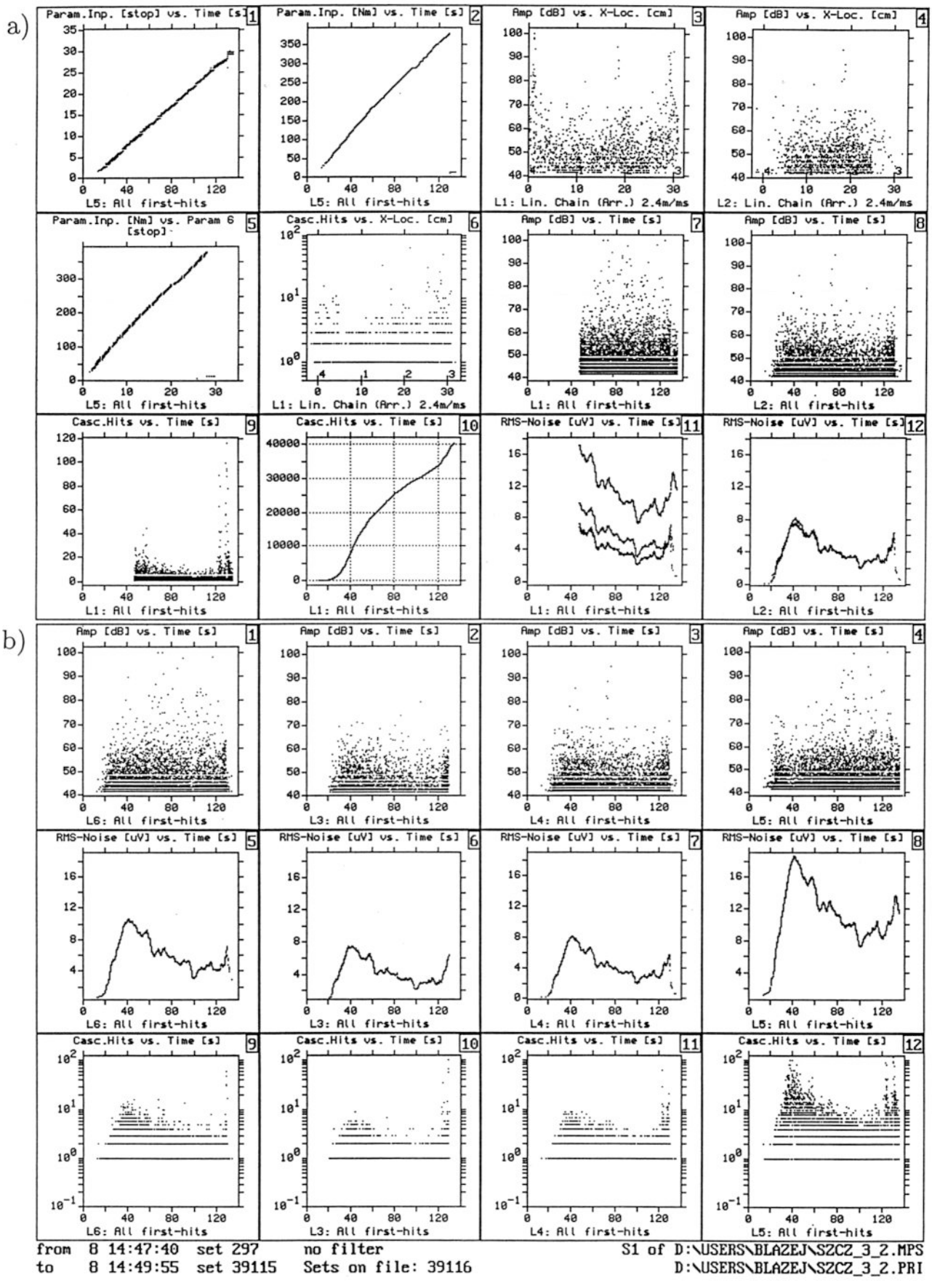
- Wszystkie rury z nawojami od N_r1 do N_r5 wykonano według tej samej procedury technologicznej. Charakteryzują się jednakowymi udziałami włókna szklanego i żywicy epoksydowej oraz tym samym kątem ułożenia włókna szklanego (tabela 4.2, strona 64). Różnią się jedynie sposobem ułożenia pasm rowingu szklanego (rys. 2.7, strona 26 i rys. 4.12, strona 65). Wytrzymałość związana jest ze zdolnością powstawania i kumulowania pęknięć w kompozycie wykonanym techniką nawijania, natomiast zdolność ta zależy od średniej długości wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ (długość wiązki pomiędzy przeplotami) oraz rozmieszczenia przeplotów.
- Zestawy wykresów EA dla wybranych próbek przedstawiono na rys. 4.17 do rys. 4.21. Obserwacje dla pozostałych próbek w ramach określonej grupy są do siebie bardzo zbliżone.
- Rury z nawojami N_r4 charakteryzują się największą wytrzymałością na skręcanie oraz największymi kątami skręcenia (rys. 4.22 oraz tabele 4.3 i 4.4, strona 74). W porównaniu do innych typów rur (z innymi nawojami) różnice w wytrzymałości i kącie skręcenia są znacznie wyższe i to aż ok. 75%. Rozrzuty wyników prób wytrzymałościowych w każdej grupie nawoju (M_{max} i ϕ) są małe i nie przekraczają 30% – wartość przyjmowana dla kompozytów włóknistych (tabele 4.3 i 4.4).
- Każdy typ rury (nawoju) charakteryzuje inna relacja maksymalnego momentu skręcającego do odpowiadającego mu kąta skręcenia (nachylenie lini łączącej $\bigcirc$ – M_{max} z $\triangle$ – ϕ, oznaczającej próbę skręcania rury ES – rys. 4.22). Skrajnymi typami rur (nawojów) z punktu widzenia nachylenia linii $\bigcirc$—$\triangle$ są N_r1 i N_r4. W obrębie danej grupy wyników rozrzut zależności momentu skręcającego $\bigcirc$ od kąta skręcania $\triangle$ jest dość znaczny, ale najmniejszy rozrzut obserwuje się dla nawoju N_r4. Nie zaobserwowano wyraźnego poślizgu próbki w uchwycie, jednak z okolic uchwytów EA jest znaczna – zwłaszcza dla rury N_r4.
- W jednej próbie skręcania dla rur N_r4 i N_r5 nie udało się wyznaczyć wielkości momentu skęcającego i dlatego wartość kąta skręcenia pozostaje „bez pary". W tych próbach dla rury z nawojem N_r5 wartość momentu jest trudna do oszacowania, natomiast dla nawoju N_r4 na podstawie wielkości kąta skręcenia oraz innych zjawisk występujących w czasie trwania próby (EA, czas trwania, wielkość siły na ramieniu korby maszyny) oszacowano moment skręcający na wyższy od 750 Nm.



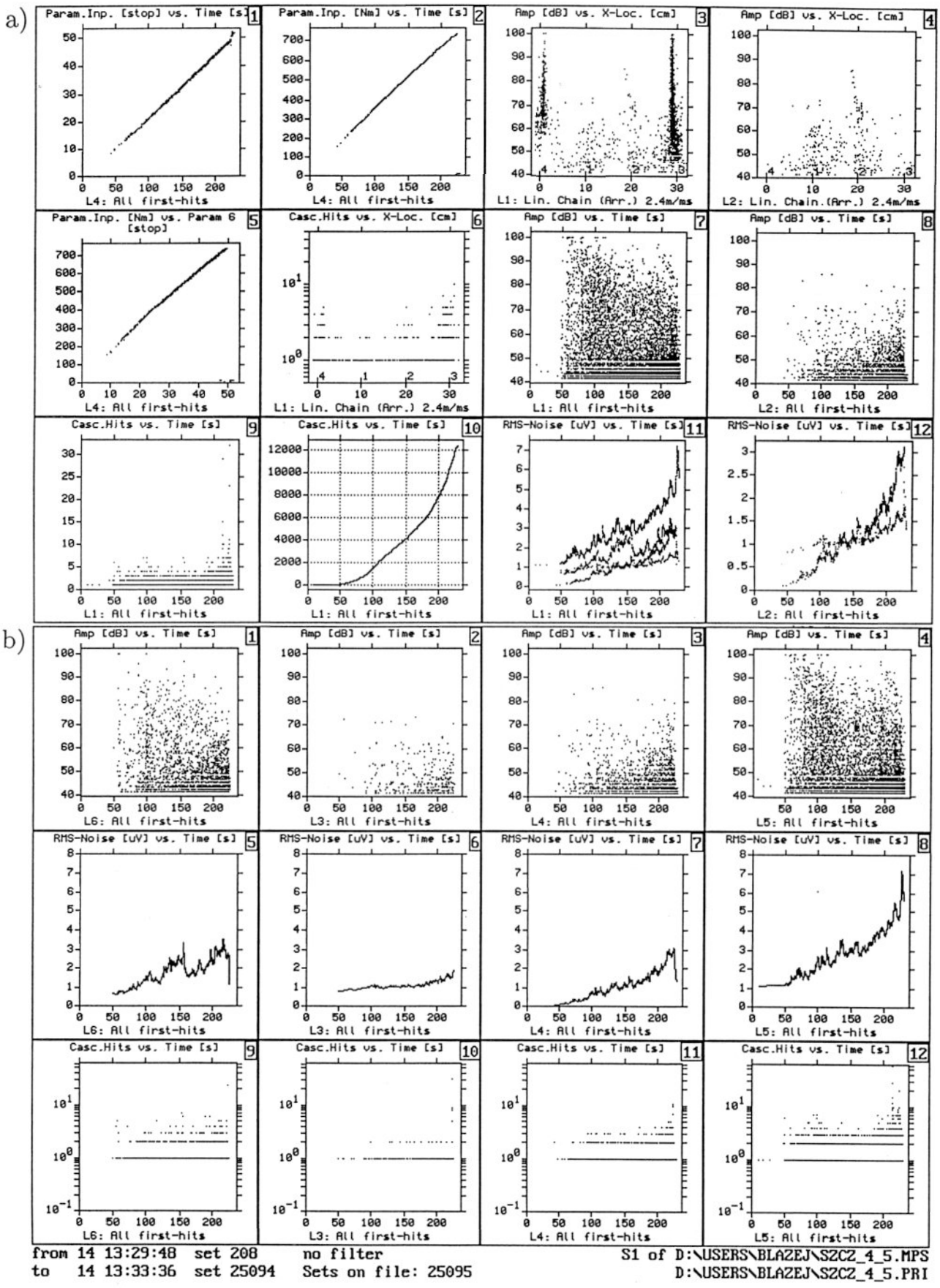
Rysunek 4.17: Zestaw wykresów badań EA dla rury o strukturze N_r 1.



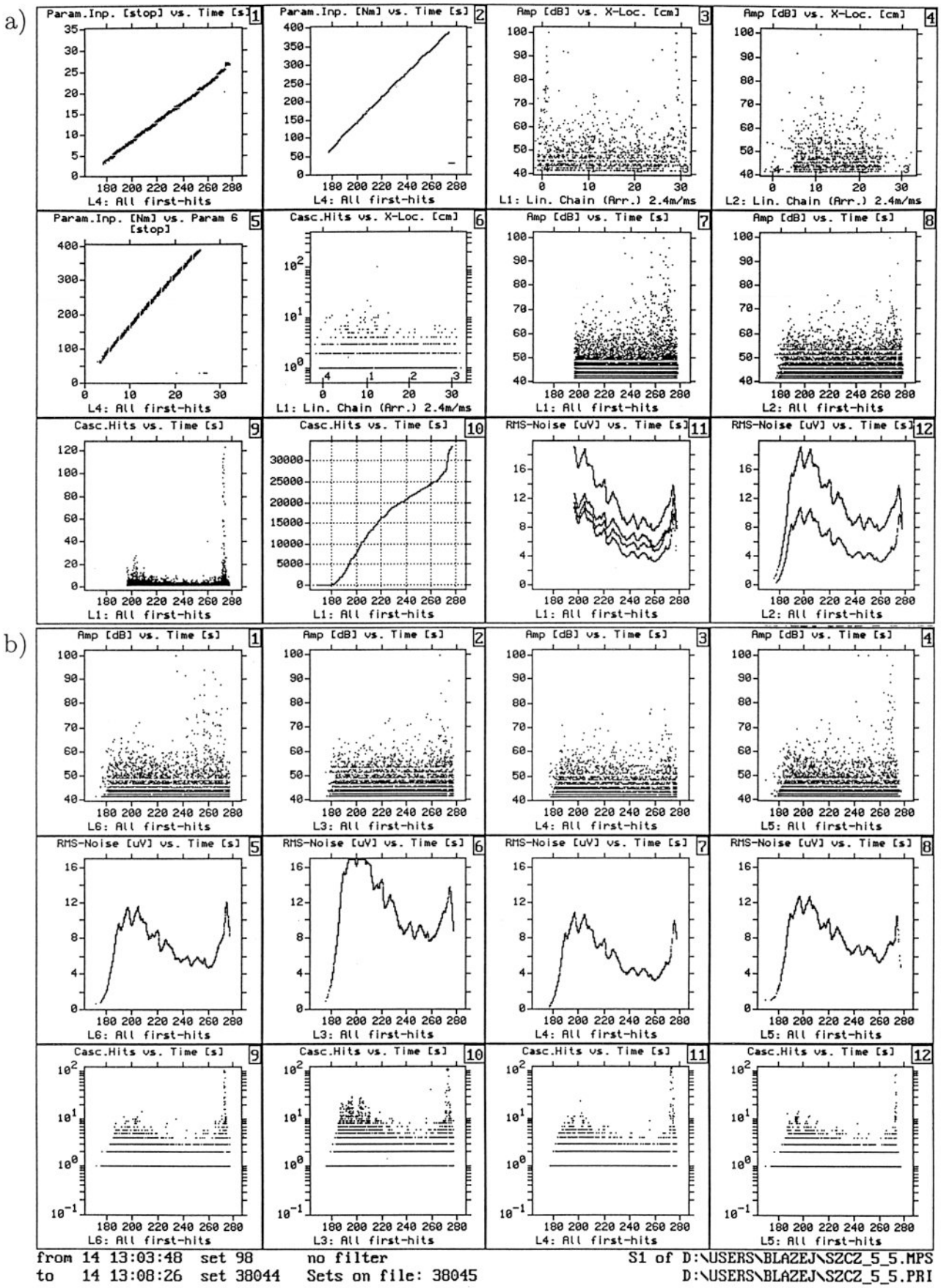
Rysunek 4.18: Zestaw wykresów badań EA dla rury o strukturze N_r 2.



Rysunek 4.19: Zestaw wykresów badań EA dla rury o strukturze N_r 3.



Rysunek 4.20: Zestaw wykresów badań EA dla rury o strukturze N_r 4.



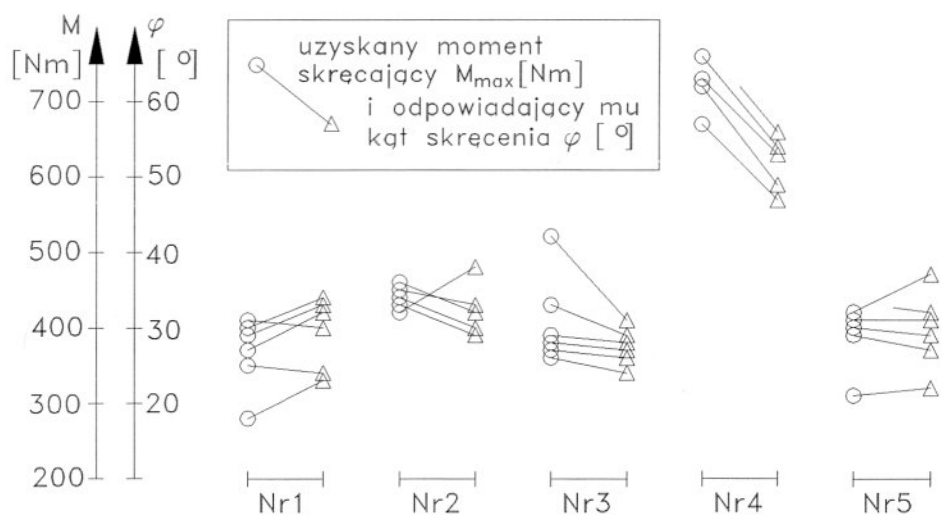
Rysunek 4.21: Zestaw wykresów badań EA dla rury o strukturze N_r 5.

rura z nawojem	pierwsza [Nm]	druga [Nm]	trzecia [Nm]	czwarta [Nm]	piąta [Nm]	średnia [Nm]
N_r1	400	375	350	410	400	387
N_r2	420	450	420	440	460	438
N_r3	520	380	380	380	430	418
N_r4	760	730	800	670	720	730
N_r5	—	320	400	390	400	378

Tablica 4.3: Wyniki badań momentu skręcającego.

rura z nawojem	pierwsza [°]	druga [°]	trzecia [°]	czwarta [°]	piąta [°]	średnia [°]
N_r1	33	32	23	30	32	30.0
N_r2	38	33	29	30	32	32.4
N_r3	31	28	26	27	28	28.0
N_r4	53	59	56	46	49	52.6
N_r5	33	22	32	29	35	30.2

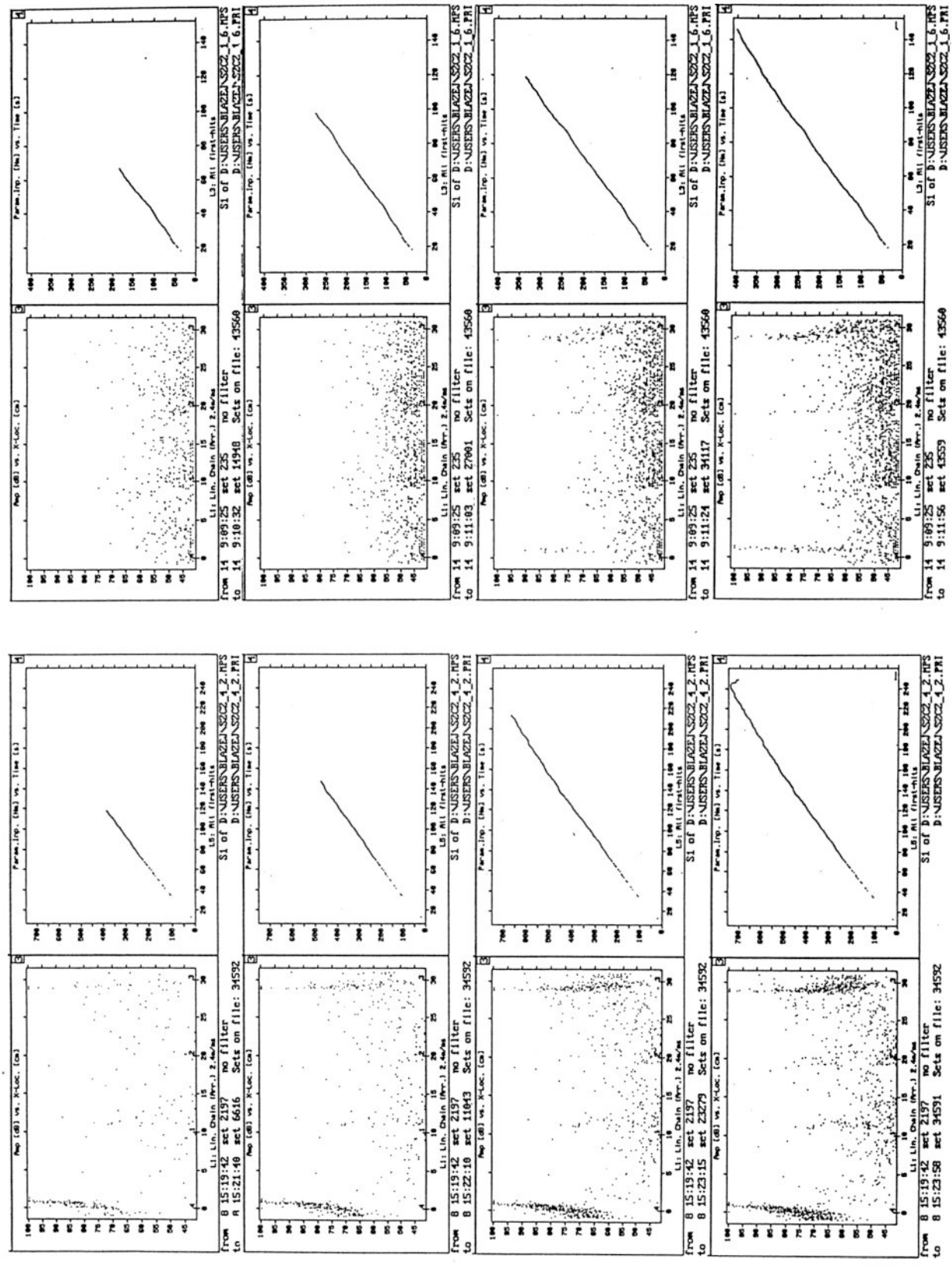
Tablica 4.4: Wyniki badań kąta skręcenia.



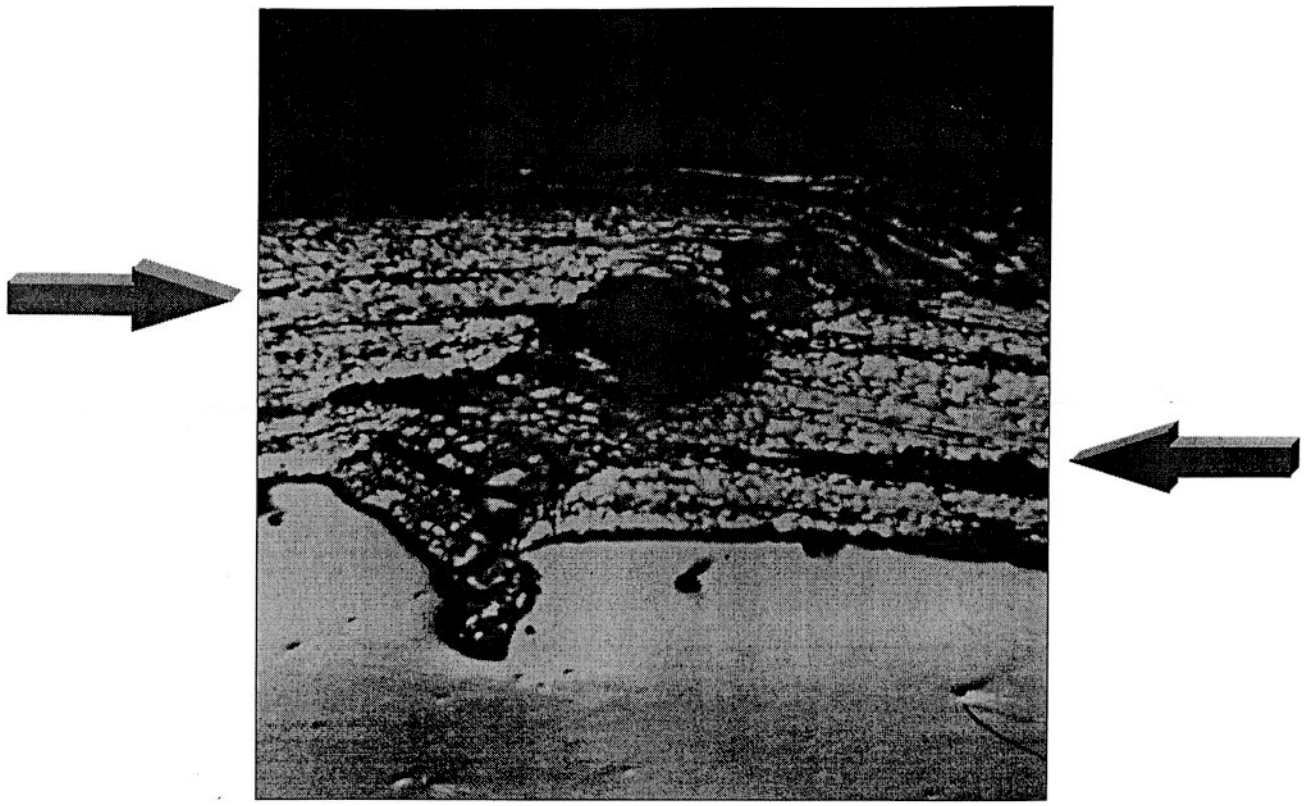
Rysunek 4.22: Wyniki badań momentu skręcającego i kąta skręcenia przedstawione w sposób graficzny.

- Próbki rur z nawojami N_r4 posiadają bardzo odmienną (korzystniejszą) emisję od pozostałych nawojów. Znalazło to odbicie również w wytrzymałości na skręcanie. Poniżej omówiono kolejne wykresy z przedstawionych na rysunkach od 4.17 do 4.21.
  - Na podstawie wyglądu krzywej z wykresów a(1), a(2) i a(5) wynika, iż próby skręcania przeprowadzano ze stałym przyrostem kąta skręcenia. Jednak wykres a(5) kąta skręcenia w funkcji momentu skęcającego dla rur z nawojem N_r4 ulega wyraźnemu zakrzywieniu od punktu o współrzędnych około (300 Nm , 20°) – punktu wytrzymałości pozostałych nawojów. Jest to spowodowane destrukcją kompozytu w uchwycie, co wyraźnie widać na wykresie a(3). Od punktu o wymienionych współrzędnych, zaczynają powstawać zagęszczenia hitów nad czujnikami zewnętrznymi 4 i 3. Zaobserwowano również dla rur z nawojem N_r4 mocne zakrzywianie się wykresu momentu skręcającego w końcowym etapie trwania próby. Jest to spowodowane zbliżającą się graniczną wytrzymałością uchwytu rury oraz odkształceniami plastycznymi kompozytu. Towarzyszy temu również silniejsza EA, zwłaszcza w okolicach uchwytów, szczególnie widoczna przy porównaniu wykresów a(3) i a(11).
  - Rury z nawojem N_r4 dają mniejszą EA od rur pozostałych przy zachowaniu znacznie większej wytrzymałości; jest to widoczne wyraźnie na wykresach a(3), a(4) i a(6). Zauważono również, iż hity rur z nawojem N_r4 są w większej mierze wysokoamplitudowymi w porównaniu do pozostałych nawojów (wykresy a(7) i a(8)). Dolna część wykresów czasowych a(7) a(8) i a(9) dla nawoju N_r4 jest z punktu widzenia gęstości hitów uboższa od pozostałych nawojów.
  - Również kształt krzywej na wykresach a(10) dla rur z nawojem N_r4 w porównaniu do pozostałych nawojów jest inny. Dla rur z nawojem N_r4 przyrost liczby hitów rośnie w sposób równomierny według funkcji wykładniczej, natomiast dla pozostałych nawojów wykresy liczby hitów w czasie charakteryzują się trzema punktami przegięcia. Ponadto liczba hitów dla pozostałych nawojów jest ponad trzy razy większa od rur z nawojem N_r4. Ma to odbicie na wykresach a(11) i a(12) oraz b(5), (6), (7) i (8). Jest to związane z innymi procesami pękania kompozytu. Rury z nawojem N_r4 charakteryzują się małym udziałem pęknięć typu mostek, a jeśli już powstają to w końcowej części obciążania. Wyraźne przegięcie krzywej a(10) w części środkowej obrazuje udział pęknięć typu mostek. Takie zachowywanie się nawojów jest związane z różną średnią długością wiązki pomiędzy przeplotami w nawoju $\bar{l}$. Początkowo pęknięcia pojawiają się pomiędzy przeplotami wzdłuż pasm, a następnie łączą się. Rury z nawojem N_r4 charakteryzują się optymalnie dobraną długością pasma pomiędzy przeplotami.
- Współczynniki „felicity" dla wszystkich rur są podobne i mieszczą się w wymaganej granicy [79] – współczynnik ten powinien wynosić 0.95. Kompozyty ES charakteryzujące się mniejszymi współczynnikami mogą być nieodporne na obciążenia statyczne.

- Na rys. 4.23 pokazano po cztery pary wykresów emisji dla rury N_r1 z N_r4. Pierwszy z nich przedstawia amplitudę zarejestrowanych hitów na długości rury, natomiast drugi moment skręcający w czasie trwania próby. Wytrzymałość rury N_r4 okazała się prawie dwa razy większa niż rury N_r1. Zakłócenia emisji pochodzącej od uchwytów w obu próbkach pojawiają się już przy $300Nm$. Natomiast całościowa emisja na długości próbki w N_r4 jest zdecydowanie mniejsza.
- Wartość kąta skręcenia narastała liniowo, aż do momentu nagłego pęknięcia próbki. Zniszczenie miało charakter gwałtowny i towarzyszył mu silny efekt akustyczny. Linia pęknięcia przebiega wzdłuż wiązki rozciąganej, zgodnie z kierunkiem nawijania wiązki – 45° (włókna ściskane uległy ścięciu) i posiada załamanie. Kształt pęknięcia przypomina rozciągniętą literę „Z" – rys. 4.15, strona 67. Taki kształt linii pęknięcia wynika z geometrii złomu – krawędzie pęknięcia nakładają się. Długość pęknięcia można określić jako jeden pełny zwój linii śrubowej. Część środkowa pęknięcia (litery „Z") ma długość od 4 do 11 mm, czyli 1 lub 2 szerokości wiązki i jest prostopadła do tworzącej rury. Można przypuszczać, iż linia środkowa jest początkiem złomu próbki, a pęknięcie wzdłuż linii śrubowej powstaje później. Analogiczny typ zniszczenia obserwowano na rurach z karbem w postaci otworu kołowego. Złom powstawał w otworze, który znajdował się w linii środkowej pęknięcia. W próbkach z nawojem N_r1 linia środkowa pęknięcia pokrywa się z linią zgrupowania przeplotów.
- Większa wartość początku emisji w próbkach N_r4 może sugerować inny obraz zniszczenia materiału – pewne mechanizmy zniszczenia są w znacznym stopniu zablokowane. Ostateczny złom może przebiegać przy mniejszym poziomie uszkodzeń. Potwierdza to wyższa wartość odkształceń początku EA i związana z nim wartość σ_p – początku pęknięć poprzecznych warstw rozciąganych, prostopadle do wzmocnienia. Wartości te dla rur N_r4 sę bardzo duże i wynoszą ok. 118 MPa. Jest to kilka razy więcej niż wartość σ_p dla pozostałych rur (28 MPa). Jedną z przyczyn aż tak dużych różnic w naprężeniach są różne wartości modułów sztywności Kirchoffa G materiału rur dla poszczególnych nawojów. Tak duża różnica jest bardzo zastanawiająca, a zjawisko to można tłumaczyć jedynie wpływem rozmieszczenia przeplotów i średnią długością wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$, które utrudniają swobodne odkształcenia warstw laminatu.
- W nawojach N_r1 i N_r5 między przeplotami występują długie pęknięcia typu *splitting* i rozwarstwienia. Ze wzrostem momentu skręcającego liczba tych pęknięć rośnie osiągając stan nasycenia, jednak ich długość jest ograniczona liniami przeplotów. Dalszy wzrost obciążenia prowadzi do złomu na linii przeplotów w skutek koncentracji naprężeń wynikających ze spiętrzenia pęknięć. W nawojach N_r2 i N_r3 występują pęknięcia translaminarne pomiędzy *warstwami* przez linie zgrupowania przeplotów. W tych nawojach linia zgrupowania przeplotów jest podzielona i nie może zatrzymać pęknięć powstających wzdłuż wiązek rowingu szklanego.



Rysunek 4.23: Porównanie skręcania próbek N_r4 i N_r1 w czterech etapach skręcenia.



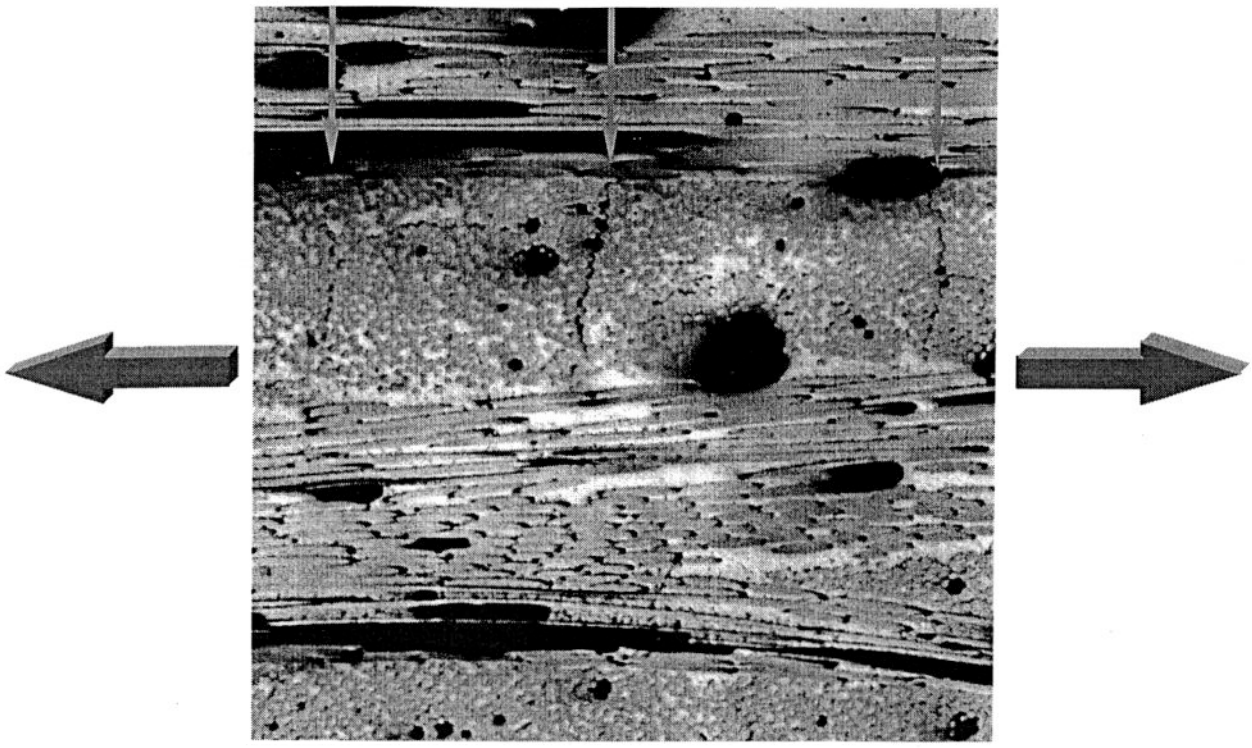
Rysunek 4.24: Wyboczenie włókien ściskanych tzw. *kinking*. Zgład wykonany prostopadle do linii pęknięcia przy powiększeniu 20 razy.

4.3.8 Mikroskopowa analiza materiału ścianki rur skręcanych

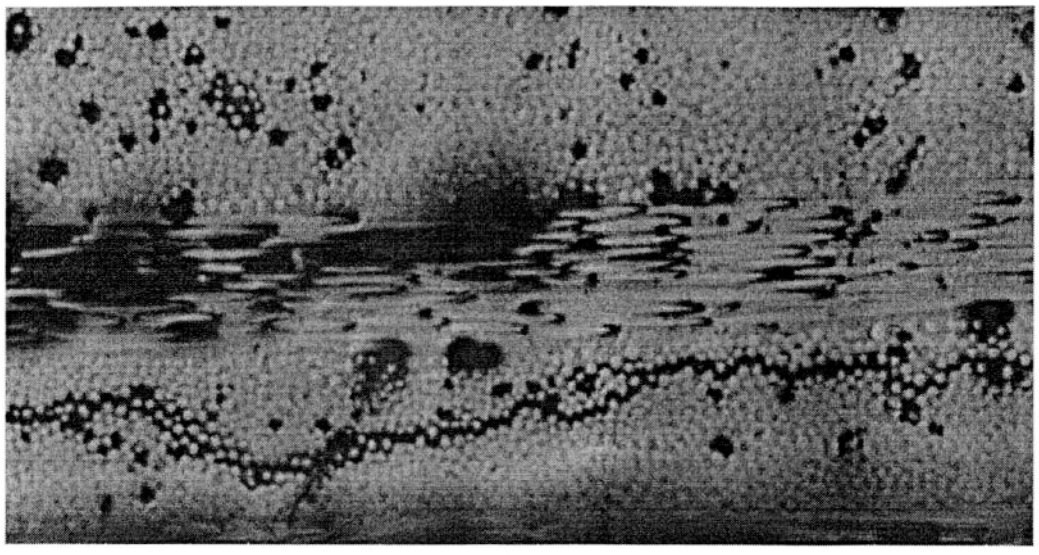
Obserwacje mikroskopowe potwierdzają podany wyżej mechanizm dekohezji kompozytowej rury skręcanej. Krytyczne naprężenie ścinające σ_{3kr} powoduje utratę stateczności pierwotnie „prostych" włókien ściskanych, które ulegają wyboczeniu. Kierunek włókien ściskanych w ściance ulega załamaniu, tworząc uskok pokazany na rys. 4.24. Taki mikromechanizm zniszczenia kompozytu nazywany jest *kinkingiem* [108] (patrz strona 6). Początek *kinkingu* ma miejsce w pobliżu powierzchni rury, gdzie włókna nie są podparte z jednej strony. Wyboczona *warstwa* oddziaływuje na sąsiednią co powoduje rozwarstwienie w okolicy pęknięcia. Widoczny na rys. 4.24 *kinking* ma miejsce tuż przy końcu linii pęknięcia w miejscu znacznie oddalonym od jego inicjacji.

W badanym materiale (we wszystkich pięciu strukturach) znajdowano pęknięcia CDS (patrz strona 6) charakterystyczne dla tego typu zbrojenia i obciążenia. Jednak najwyraźniejsze obrazy tych pęknięć obserwowano w rurach z nawojami N_r4. Na rys. 4.25 przedstawiono przykładowy widok pęknięć typu CDS (poprzeczne, ciemne pęknięcia) zaobserwowany w ściance rury z nawojem N_r4.

Na powierzchniach przekroju badanych rur (zwłaszcza N_r1) obserwowano liczne rozwarstwienia, pęknięcia delaminujące. Rys. 4.26 przedstawia przykład takiego pęknięca zaobserwowanego na próbce z nawojem N_r1.



Rysunek 4.25: Pęknięcia typu CDS w ściance rury z nawojem N_r4. Powiększenie 125 razy.



Rysunek 4.26: Rozwarstwienie (delaminacja), próbka z nawojem N_r1, powiększenie 125 razy.

4.3.9 Podsumowanie badań rur ES na skręcanie

— Wyniki przeprowadzonych badań kompozytowych elementów nawijanych na skręcanie świadczą o tym, że struktura (sposób ułożenia pasm) ma istotny wpływ na wytrzymałość. Wartości naprężeń niszczących są różne przy różnych typach nawojów. Odmienny charakter mają także złomy – zwłaszcza porównanie N_r1 z N_r4. Metoda EA pozwoliła na wykrycie różnic w przebiegu procesów destrukcji w rurach różniących się typami nawojów. W punkcie 4.3.7, strona 68 szeroko omówiono wyniki badań EA oraz wskazano typ nawoju o optymalnej średniej długości wiązki pomiędzy przeplotami $\bar{l}$. Jest to nawój N_r4 dla którego $\bar{l} = 2.49e$.

— Wykazano, iż ocenę jakości wykonania kompozytu oraz stan jego zdefektowania można wykonać statycznie wykorzystując funkcję nadawczą aparatury AMS3 (autokalibracja). Pomiar prędkości rozchodzenia się fali akustycznej oraz jej tłumienie jest funkcją stanu materiału ES – punkt 3.4, strona 42 i 3.7, strona 47.

— Nawój N_r1 ma bardzo niekorzystnie rozmieszczone przeploty. W przypadku zastosowania w konstrukcyjnych elementach rurowych poddanych skręcaniu, pomiędzy miejscami zaznaczonymi strzałką na rys. 2.7, strona 26 powstają pęknięcia translaminarne. Linia przeplotów jest granicą rozprzestrzeniania się pęknięć. Gdy nagromadzone naprężenia styczne po obu stronach granicy przeplotów osiągną wartość krytyczną następuje zniszczenie rury. Dowodem tych stwierdzeń są wyglądy badanych rur z nawojem N_r1. Załamanie linii pęknięcia (część środkowa rozciągniętej litery „Z" – rys. 4.15, strona 67) wypada na linii przeplotów w miejscu nagromadzenia się naprężeń stycznych o wartości krytycznej. Analogiczny typ zniszczenia obserwowano na rurach z karbem w postaci otworu kołowego. Badania ciśnieniowe rur również potwierdzają ten sposób niszczenia. Wzrost ciśnienia do wartości krytycznej powoduje złom na linii przeplotów w wyniku nagromadzenia się krytycznych naprężeń stycznych po obu stronach linii przeplotów (rys. 4.3a, strona 54).

— Uznano za celowe zweryfikowanie powyższych wyników poprzez ponowne badania rur na skręcanie, lecz na innych materiałach.

4.4 Badania wysokociśnieniowych butli ES

W IEL/OW od kilku lat wykonuje się dla krajowego przemysłu lotniczego butle ciśnieniowe awaryjnego wodowania śmigłowca o ciśnieniu roboczym gazu obojętnego 240 *barów* i ciśnieniu niszczącym co najmniej 576 *barów* (zgodnie z wymogami Dozoru Technicznego [114]). Szersze informacje dotyczące butli kompozytowych zamieszczono we wstępie oraz w załączniku. Oplot ES badanych butli próbnych wykonano na zbiornikach ze stali miękkiej, stosowanych we wspomnianych wyżej butlach lotniczych. Przy ustalaniu programu badań wykorzystano wyniki projektowe jak i eksperymentalne, uzyskane przy opracowywaniu butli lotniczych. Wykorzystano metodę tablicową do: projektowania, analizy nawijania i doboru nawoju dla płaszcza nośnego butli (punkt 2.3.1, strona 28). Butle wykonano na nawijarce łańcuchowej, według zasad opisanych w punkcie 2.3.4, strona 32. Wykonano 4 butle próbne różniące się nawojem oraz grubością kompozytowej ścianki nośnej (liczbą *warstw*). Najważniejsze dane o butlach zamieszczono w tabeli 4.5, strona 84. Przeprowadzono analizę wytrzymałościową i przedstawiono w załączniku. Program badań EA opracowano zgodnie z aktualnymi standardami zagranicznymi i danymi z literatury [3, 4, 5, 79]. Badania przedstawione w niniejszym podrozdziale miały na celu:

- sprawdzenie wpływu struktury nawiniętego nośnika długowłóknistego (głównie rozmieszczenia przeplotów) na zachodzące procesy pękania kompozytu oraz wytrzymałość końcową butli ES,
- potwierdzenie zjawisk zachodzących w obciążanym kompozycie na podstawie EA,
- sprawdzenia dokładności analizy teoretycznej wytrzymałości kompozytowego płaszcza nośnego butli,
- przedstawienie kolejnego potwierdzenia użyteczności metody tablicowej do opisu struktur nawijanych.

Butle badano ciśnieniowo do zniszczenia, jednak tylko w badaniach butli **3** i **4** rejestrowano EA oraz wartości odkształceń metodą tensometrii oporowej. Dla butli **3** z nawojem N_r1 wykonano dodatkowo pomiar przemieszczeń powierzchni zewnętrznej metodą interferometrii holograficznej. Obserwacje porównawcze (EA i inne) dwóch rodzajów struktur butli kompozytowych pozwalają stwierdzić, iż rozmieszczenie przeplotów ma wpływ na wytrzymałość elementu. Wyniki badań butli ES przedstawiano w pracach [14, 15, 20, 21, 22, 24, 26].

4.4.1 Dobór nawoju

Przy wyborze nawoju dla butli kompozytowych posłużono się metodą tablicową, przedstawioną w rozdziale 2. Dla butli **1** i **2** ustalono następujące dane:

- Obwód $\pi d = 368.2mm$, gdzie: d – średnica butli wynosząca $117.2mm$.
- Kąt nawijania $\alpha = 54°$ [72].
- Długość części walcowej $l = s(k + a) = 780^{\pm 10mm}$,
  gdzie: $s = \pi d / \operatorname{tg} \alpha = 267.5mm$ (skok nawijania),
  k – liczba naturalna, określająca liczbę skoków,
  a – współczynnik reszty skoku nawijania (wybrany z tabeli nawojów rys. 4.27).
- Szerokość pasma w przekroju poprzecznym butli:

$$e_x = \frac{e}{\cos \alpha} = \frac{7.4}{\cos 54°} = 12.6mm \tag{4.2}$$

Nr	$\pi\, d$	α
0	0 – 1	0
1	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29	1/58
2	0 15 1 16 2 17 3 18 4 19 5 20 6 21 7 22 8 23 9 24 10 25 11 26 12 27 13 28 14 29	2/58
3	0 10 20 1 11 21 2 12 22 3 13 23 4 14 24 5 15 25 6 16 26 7 17 27 8 18 28 9 19 29	3/58
4	0 22 15 8 1 23 16 9 2 24 17 10 3 25 18 11 4 26 19 12 5 27 20 13 6 28 21 14 7 29	4/58
5	0 6 12 18 24 1 7 13 19 25 2 8 14 20 26 3 9 15 21 27 4 10 16 22 28 5 11 17 23 29	5/58
6	0 5 10 15 20 25 1 6 11 16 21 26 2 7 12 17 22 27 3 8 13 18 23 28 4 9 14 19 24 29	6/58
7	0 25 21 17 13 9 5 1 26 22 18 14 10 6 2 27 23 19 15 11 7 3 28 24 20 16 12 8 4 29	7/58
8	0 11 22 4 15 26 8 19 1 12 23 5 16 27 9 20 2 13 24 6 17 28 10 21 3 14 25 7 18 29	8/58
9	0 13 26 10 23 7 20 4 17 1 14 27 11 24 8 21 5 18 2 15 28 12 25 9 22 6 19 3 16 29	9/58
10	0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 1 4 7 10 13 16 19 22 25 28 2 5 8 11 14 17 20 23 26 29	10/58
11	0 8 16 24 3 11 19 27 6 14 22 1 9 17 25 4 12 20 28 7 15 23 2 10 18 26 5 13 21 29	11/58
12	0 17 5 22 10 27 15 3 20 8 25 13 1 18 6 23 11 28 16 4 21 9 26 14 2 19 7 24 12 29	12/58
13	0 9 18 27 7 16 25 5 14 23 3 12 21 1 10 19 28 8 17 26 6 15 24 4 13 22 2 11 20 29	13/58
14	0 27 25 23 21 19 17 15 13 11 9 7 5 3 1 28 26 24 22 20 18 16 14 12 10 8 6 4 2 29	14/58
15	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29	15/58
16	0 20 11 2 22 13 4 24 15 6 26 17 8 28 19 10 1 21 12 3 23 14 5 25 16 7 27 18 9 29	16/58
17	0 12 24 7 19 2 14 26 9 21 4 16 28 11 23 6 18 1 13 25 8 20 3 15 27 10 22 5 17 29	17/58
18	0 21 13 5 26 18 10 2 23 15 7 28 20 12 4 25 17 9 1 22 14 6 27 19 11 3 24 16 8 29	18/58
19	0 26 23 20 17 14 11 8 5 2 28 25 22 19 16 13 10 7 4 1 27 24 21 18 15 12 9 6 3 29	19/58
20	0 16 3 19 6 22 9 25 12 28 15 2 18 5 21 8 24 11 27 14 1 17 4 20 7 23 10 26 13 29	20/58
21	0 18 7 25 14 3 21 10 28 17 6 24 13 2 20 9 27 16 5 23 12 1 19 8 26 15 4 22 11 29	21/58
22	0 4 8 12 16 20 24 28 3 7 11 15 19 23 27 2 6 10 14 18 22 26 1 5 9 13 17 21 25 29	22/58
23	0 24 19 14 9 4 28 23 18 13 8 3 27 22 17 12 7 2 26 21 16 11 6 1 25 20 15 10 5 29	23/58
24	0 23 17 11 5 28 22 16 10 4 27 21 15 9 3 26 20 14 8 2 25 19 13 7 1 24 18 12 6 29	24/58
25	0 7 14 21 28 6 13 20 27 5 12 19 26 4 11 18 25 3 10 17 24 2 9 16 23 1 8 15 22 29	25/58
26	0 19 9 28 18 8 27 17 7 26 16 6 25 15 5 24 14 4 23 13 3 22 12 2 21 11 1 20 10 29	26/58
27	0 14 28 13 27 12 26 11 25 10 24 9 23 8 22 7 21 6 20 5 19 4 18 3 17 2 16 1 15 29	27/58
28	0 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 29	28/58
29	0 – 1	29/58
30	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29	30/58
31	0 15 1 16 2 17 3 18 4 19 5 20 6 21 7 22 8 23 9 24 10 25 11 26 12 27 13 28 14 29	31/58
32	0 10 20 1 11 21 2 12 22 3 13 23 4 14 24 5 15 25 6 16 26 7 17 27 8 18 28 9 19 29	32/58
33	0 22 15 8 1 23 16 9 2 24 17 10 3 25 18 11 4 26 19 12 5 27 20 13 6 28 21 14 7 29	33/58
34	0 6 12 18 24 1 7 13 19 25 2 8 14 20 26 3 9 15 21 27 4 10 16 22 28 5 11 17 23 29	34/58
35	0 5 10 15 20 25 1 6 11 16 21 26 2 7 12 17 22 27 3 8 13 18 23 28 4 9 14 19 24 29	35/58
36	0 25 21 17 13 9 5 1 26 22 18 14 10 6 2 27 23 19 15 11 7 3 28 24 20 16 12 8 4 29	36/58
37	0 11 22 4 15 26 8 19 1 12 23 5 16 27 9 20 2 13 24 6 17 28 10 21 3 14 25 7 18 29	37/58
38	0 13 26 10 23 7 20 4 17 1 14 27 11 24 8 21 5 18 2 15 28 12 25 9 22 6 19 3 16 29	38/58
39	0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 1 4 7 10 13 16 19 22 25 28 2 5 8 11 14 17 20 23 26 29	39/58
40	0 8 16 24 3 11 19 27 6 14 22 1 9 17 25 4 12 20 28 7 15 23 2 10 18 26 5 13 21 29	40/58
41	0 17 5 22 10 27 15 3 20 8 25 13 1 18 6 23 11 28 16 4 21 9 26 14 2 19 7 24 12 29	41/58
42	0 9 18 27 7 16 25 5 14 23 3 12 21 1 10 19 28 8 17 26 6 15 24 4 13 22 2 11 20 29	42/58
43	0 27 25 23 21 19 17 15 13 11 9 7 5 3 1 28 26 24 22 20 18 16 14 12 10 8 6 4 2 29	43/58
44	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29	44/58
45	0 20 11 2 22 13 4 24 15 6 26 17 8 28 19 10 1 21 12 3 23 14 5 25 16 7 27 18 9 29	45/58
46	0 12 24 7 19 2 14 26 9 21 4 16 28 11 23 6 18 1 13 25 8 20 3 15 27 10 22 5 17 29	46/58
47	0 21 13 5 26 18 10 2 23 15 7 28 20 12 4 25 17 9 1 22 14 6 27 19 11 3 24 16 8 29	47/58
48	0 26 23 20 17 14 11 8 5 2 28 25 22 19 16 13 10 7 4 1 27 24 21 18 15 12 9 6 3 29	48/58
49	0 16 3 19 6 22 9 25 12 28 15 2 18 5 21 8 24 11 27 14 1 17 4 20 7 23 10 26 13 29	49/58
50	0 18 7 25 14 3 21 10 28 17 6 24 13 2 20 9 27 16 5 23 12 1 19 8 26 15 4 22 11 29	50/58
51	0 4 8 12 16 20 24 28 3 7 11 15 19 23 27 2 6 10 14 18 22 26 1 5 9 13 17 21 25 29	51/58
52	0 24 19 14 9 4 28 23 18 13 8 3 27 22 17 12 7 2 26 21 16 11 6 1 25 20 15 10 5 29	52/58
53	0 23 17 11 5 28 22 16 10 4 27 21 15 9 3 26 20 14 8 2 25 19 13 7 1 24 18 12 6 29	53/58
54	0 7 14 21 28 6 13 20 27 5 12 19 26 4 11 18 25 3 10 17 24 2 9 16 23 1 8 15 22 29	54/58
55	0 19 9 28 18 8 27 17 7 26 16 6 25 15 5 24 14 4 23 13 3 22 12 2 21 11 1 20 10 29	55/58
56	0 14 28 13 27 12 26 11 25 10 24 9 23 8 22 7 21 6 20 5 19 4 18 3 17 2 16 1 15 29	56/58
57	0 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 29	57/58
58	0 – 1	58/58

Rysunek 4.27: Pełna tablica nawojów dla 29 przejść suportu. Zapisując kolejne wiersze tablicy kierowano się zasadami: „jedynka na przekątnej" i „odległość $0 \longleftrightarrow 1$ jest krokiem".

gdzie: $e = 7.4mm$ – szerokość pasma,

- Parametr przeskoku wiązki p określono doświadczalnie. Dla rozpatrywanej dennicy sferycznej $p = 19$.

Wszystkie możliwe przypadki nawojów zgrupowano w tablicy przedstawionej na rys. 4.27. Do zinterpretowania tablicy dla butli należy przeprowadzić następujące operacje:

- wyznaczenie teoretycznej długości butli L. W tym celu należy zsumować następujące czynniki:
  - długość części walcowej $l = s(k + a) = 780^{\pm 10}$,
  - podwojony parametr przeskoku wiązki, podzielony przez $\operatorname{tg}\alpha$:

$$L = \frac{2 \cdot p \cdot e_x}{\operatorname{tg}\alpha} + l = \frac{2 \cdot 19 \cdot 12.6}{\operatorname{tg} 54^\circ} + 780^{\pm 10} = 347.6 + 780^{\pm 10} = 1127.6^{\pm 10} mm \quad (4.3)$$

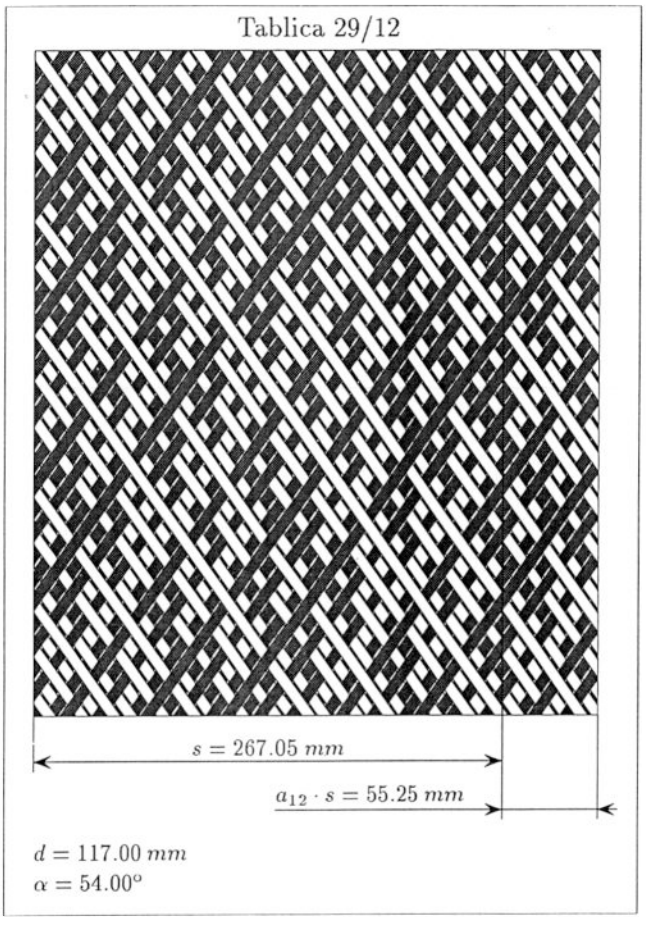
- z teoretycznej długości butli $L = k' \cdot s + a \cdot s = 4 \cdot s + a \cdot s$ (k' — liczba skoków) należy wyznaczyć a – w tym celu podzielono teoretyczną długości butli przez s. Po odjęciu od wyniku części naturalnej ($k' = 4$) otrzymano współczynnik reszty skoku nawijania a:

$$\frac{L}{s} = \frac{1127.6mm}{267.5mm} = 4.2151 \Longrightarrow a = 0.2151 \quad (4.4)$$

Wyznaczonemu współczynnikowi a najbliższy jest nawój 29/12 z tablicy ($a_{12} = 12/58 = 0.2069$). Zgodnie z zasadą podobieństwa nawojów w tablicy nawój 29/12 należy do grupy nawojów: (12, 17, 41, 46). Wymieniona grupa nawojów charakteryzuje się dobrym rozmieszczeniem przeplotów. Na rys. 4.28 przedstawiono widok nawoju 29/12. Do zakończenia zadania pozostaje sprawdzić czy długość butli mieści się w zadanej tolerancji. W tym celu należy przeprowadzić czynności odwrotne do wyznaczania współczynnika a, ale już z wartością odczytaną z tablicy dla nawoju 29/12 — $a_{12} = 0.2069$. Wyznaczona rzeczywista długość części walcowej $l_{12w} = 777.8mm$ z powodzeniem mieści się w zadanej tolerancji $l = 780^{\pm 10} mm$.

4.4.2 Wykonanie butli próbnych

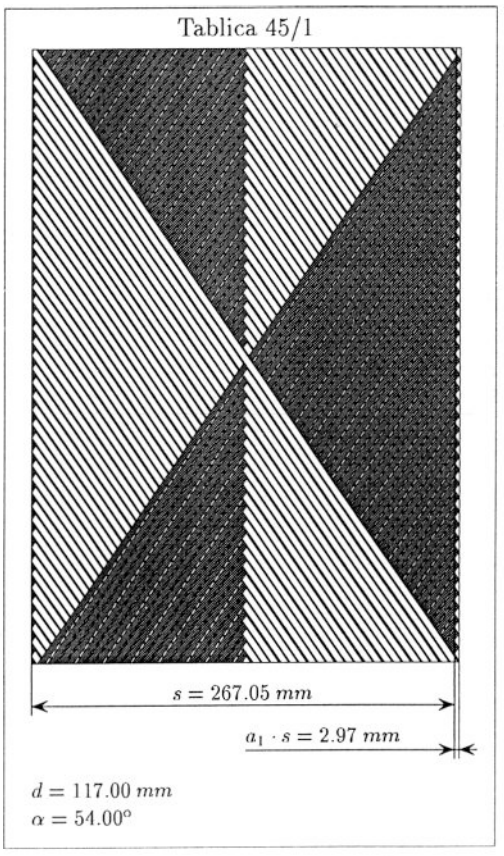
Stanowisko do wykonywania butli jest adaptacją nawijarki uniwersalnej do rur zaprojektowanej w IEL/OW. Zasadę działania nawijarki oraz możliwości ustawień i regulacji przedstawiono w [76, 77]. Nawijarkę wyposażono w szereg dodatkowych zespołów zapewniających uzyskanie kompozytu dobrej jakości. Wygrzewanie utwardzające nawiniętych butli przeprowadzono w dwóch etapach, wstępne 12 godzin w $80^\circ C$ i zasadnicze 6 godzin w $140^\circ C$. Szczegółowy opis technologii wykonywania butli zawarto w [14]. Przy określaniu liczby ogniw łańcucha posłużono się metodą opisaną w punkcie 2.3.4, strona 32. Wykonano cztery butle próbne różniące się: nawojem, typem włókna szklanego oraz grubością kompozytowej ścianki nośnej (liczbą *warstw*). Najważniejsze dane o wykonanych butlach zamieszczono w tabeli 4.5. Schemat butli oraz wymiary gabarytowe przedstawiono w załączniku oraz na rys. 4.36, strona 90. Widoki nawojów 1/45 i 7/45 oraz tablicę przedstawiono na rysunkach 4.29, 4.30 i 4.31.



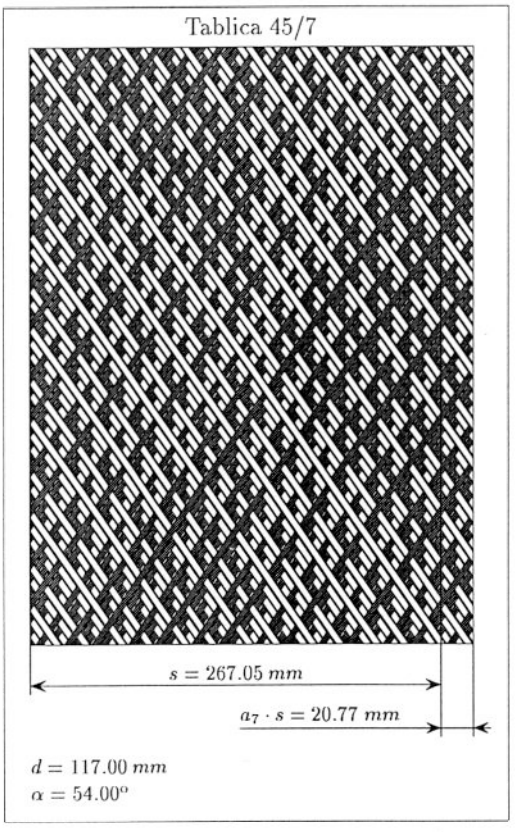
Rysunek 4.28: Widok nawoju 29/12.

nr bu-tli	grubość laminatu ES [mm]	masa lami-natu w cz. walc. [kg]	rowing [tex]	dobrany nawój	liczba wiązek w obwodzie	liczba *warstw*	ciśnienie niszczące z badań
1	5.4	4.1	2400	12/29	870	15	527 [*barów*]
2	6.1	4.7	2400	12/29	986	17	590 [*barów*]
3	5.3	4.2	1200	1/45	1170	13	425 [*barów*]
4	4.9	3.8	1200	7/45	1170	13	425 [*barów*]

Tablica 4.5: Dane opisujące wykonane butle próbne.

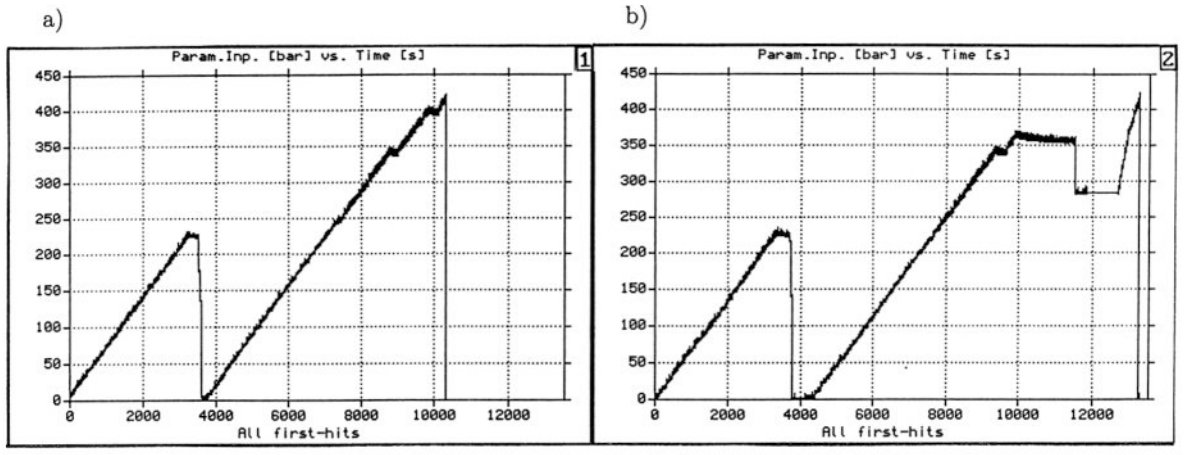


Rysunek 4.29: Widok nawoju 1/45 butli **3**.



Rysunek 4.30: Widok nawoju 7/45 butli **4**.

| Liczba wiązek rowingu: 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | a_{Nr} = |
|---|---|---



Rysunek 4.32: Pierwszy i drugi etap obciążania butli **3** – a) i **4** – b).

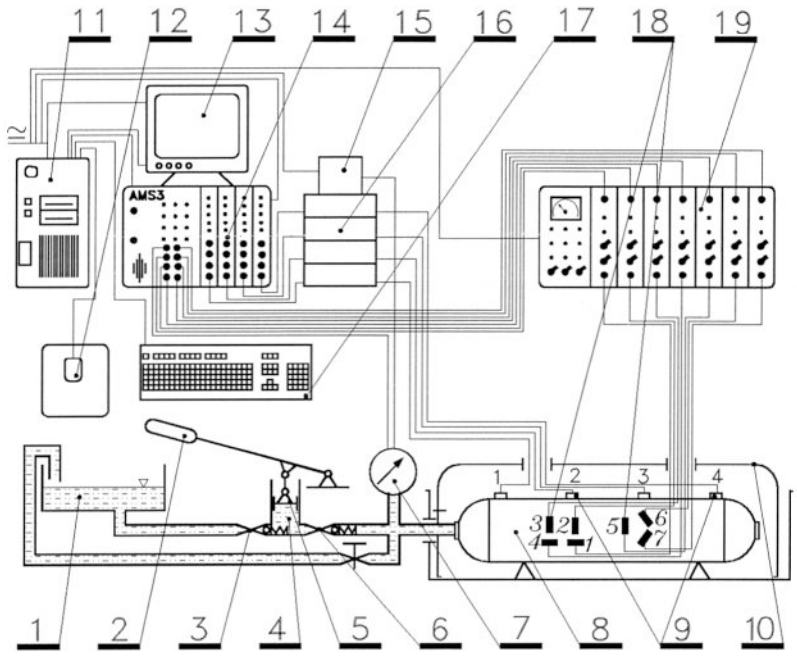
4.4.4 Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na specjalnym stanowisku własnej konstrukcji zapewniającym pełne bezpieczeństwo. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 4.33 oraz trzy główne bloki na zdjęciach rys. 4.34. Na zdjęciu rys. 4.34b widoczny jest układ wytwarzania ciśnienia w butli. Na zdjęciu rys. 4.34c widoczny jest zestaw pomiarowy AMS3 (oprócz czujników i przedwzmacniaczy) złożony z jednostki centralnej układu pomiarowego EA (14) oraz komputera (11) z osprzętem. Wybrane informacje z monitora przesyłane są do drukarki pracującej w sieci komputerowej. W skład stanowiska badawczego wchodzi jeszcze układ tensometrycznego pomiaru odkształcenia, którego zasadniczą część stanowi mostek tensometryczny (19), pokazany na schemacie 4.33.

4.4.5 Układ ciśnienia

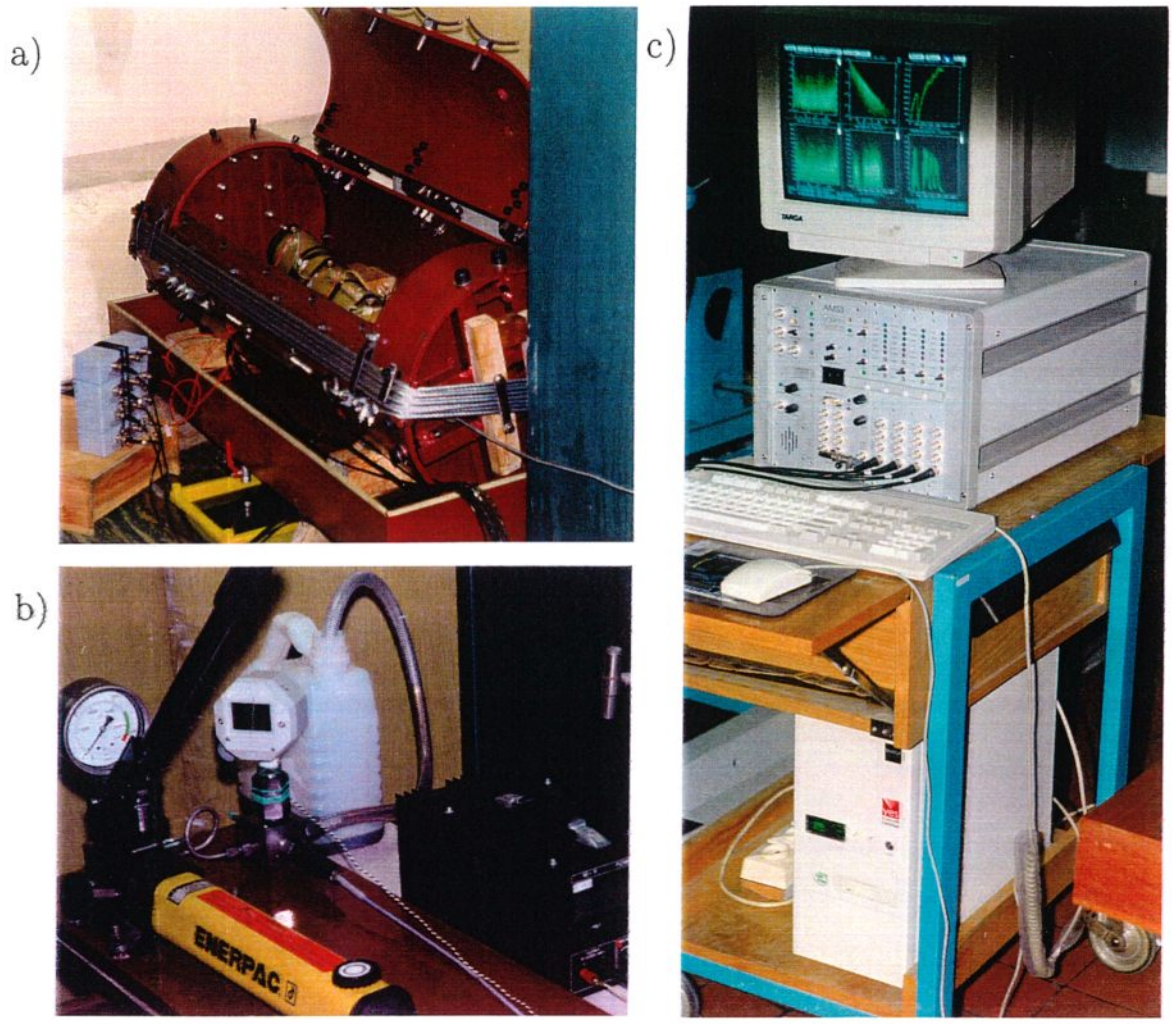
Do wytwarzania ciśnienia w badaniach butli **1** i **2** stosowano pompę ręczną ze śrubowym posuwem tłoka i ręcznie obsługiwanymi zaworami firmy VEB Messgeratewerk o zakresie do 2500 *barów*. Stanowisko to opisano w [20, 22]. Do badań butli **3** oraz **4** stanowisko zmodernizowano, stosując pompę z dźwigniowym posuwem tłoka firmy ENERPAC o zakresie do 2800 *barów*. W pompie śrubowej stosowano olej hydrauliczny 68 (HYDRO 40), natomiast w pompie dźwigniowej specjalnie przeznaczony olej firmy ENERPAC. Miernik cyfrowy manometru pompy typu PE-200 firmy Hottinger BM podawał wyniki w zakresie do 2000 *barów* z dokładnością 2 *bary*. Dla pewności pomiaru ciśnienia w badaniach butli **3** i **4** stosowano równolegle ciśnieniomierz wskazówkowy oraz przetwornik własnej konstrukcji. Pompa została sprawdzona zarówno ze względu na powtarzalność danych na wyjściu sygnału prądowego, jak też ze względu na szczelność układu ciśnienia. Informacje te są istotne przy pomiarach EA.

Po zatrzymaniu pompowania oleju na poziomach 50%, 75% oraz poziomie wystąpienia silnej EA nie można było utrzymać dokładnie stałego poziomu ciśnienia. Przy ciśnieniu 250 *barów*, po zatrzymaniu pompowania oleju w czasie 1 *min*, ciśnienie spadło o 1.25 %. Podobne efekty obserwowano w badaniu butli lotniczych [14, 20, 22].

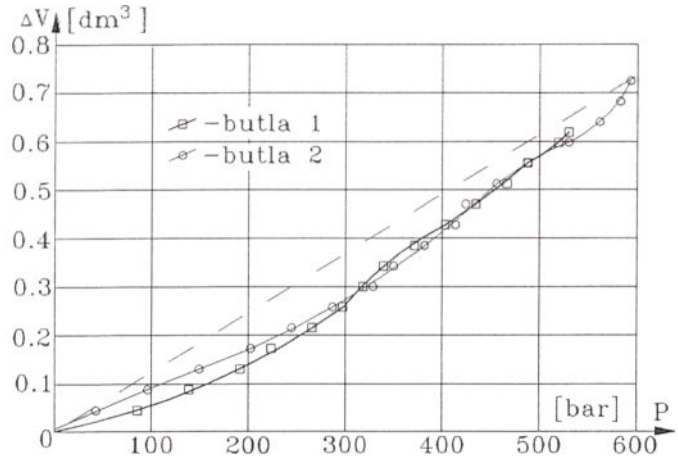


Rysunek 4.33: Schemat stanowiska badawczego. 1 – zbiornik oleju, 2 – dźwignia, 3 – zawór odcinający zbiornik oleju, 4 – cylinder pompy, 5 – tłok pompy, 6 – zawór odcinający element badany od pompy, 7 – manometry (cyfrowy z przetwornikiem, wskazówkowy oraz przetwornik ciśnienia), 8 – badana butla kompozytowa, 9 – czujniki akustyczne, 10 – osłona bezpieczeństwa, 11 – komputer, 12 – mysz, 13 – monitor, 14 – centralne urządzenie AMS3 do pomiaru EA, 15 – stabilizowany zasilacz manometru cyfrowego, 16 – przedwzmacniacze, 17 – klawiatura komputera, 18 – tensometry, 19 – mostek tensometryczny.

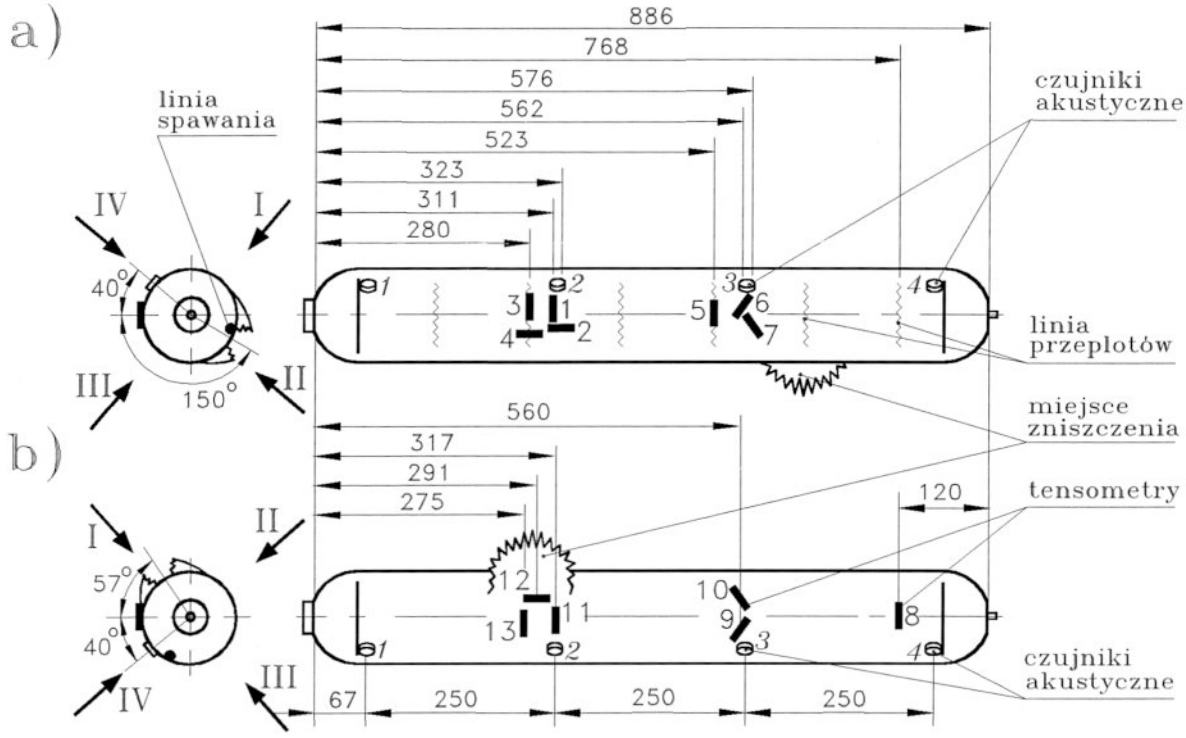
Na rys. 4.35 pokazano wykres odkształcania się butli **1** i **2** w funkcji ciśnienia. Wykres wyznaczono na podstawie załamań wykresu ciśnienia w czasie (w wyniku napełniania pompy) oraz objętości cylindra pompy śrubowej. Obydwie butle początkowo odkształcały się nieliniowo. Spowodowane to było ściśliwością pozostałego w układzie gazu. Po osiągnięciu ciśnienia około 150 *barów* wykres był liniowy. W końcowej fazie obciążania butli **2** nastąpiło zakrzywienie wykresu sugerujące rodzaj umocnienia materiału butli. Początkowi tego zakrzywienia towarzyszył słyszalny znaczny sygnał dźwiękowy. Przyczyną tego zjawiska było powstanie pęknięć włókien szklanych (prawdopodobnie całej wiązki), a następnie nieznaczne odkształcenie wewnętrznego zbiornika metalowego.



Rysunek 4.34: Widok stanowiska badawczego. a) badana butla z czujnikami akustycznymi w osłonie bezpieczeństwa oraz widoczne przedwzmacniacze, b) pompa oleju z ciśnieniomierzami (ciśnieniomierz wskazówkowy, cyfrowy oraz przetwornik) i zasilaczem, c) zestaw pomiarowy w skład którego wchodzi komputer z osprzętem, urządzenie rejestrujące AMS3 firmy VALLEN. Oznaczenia poszczególnych elementów są zgodne ze schematem stanowiska badawczego.



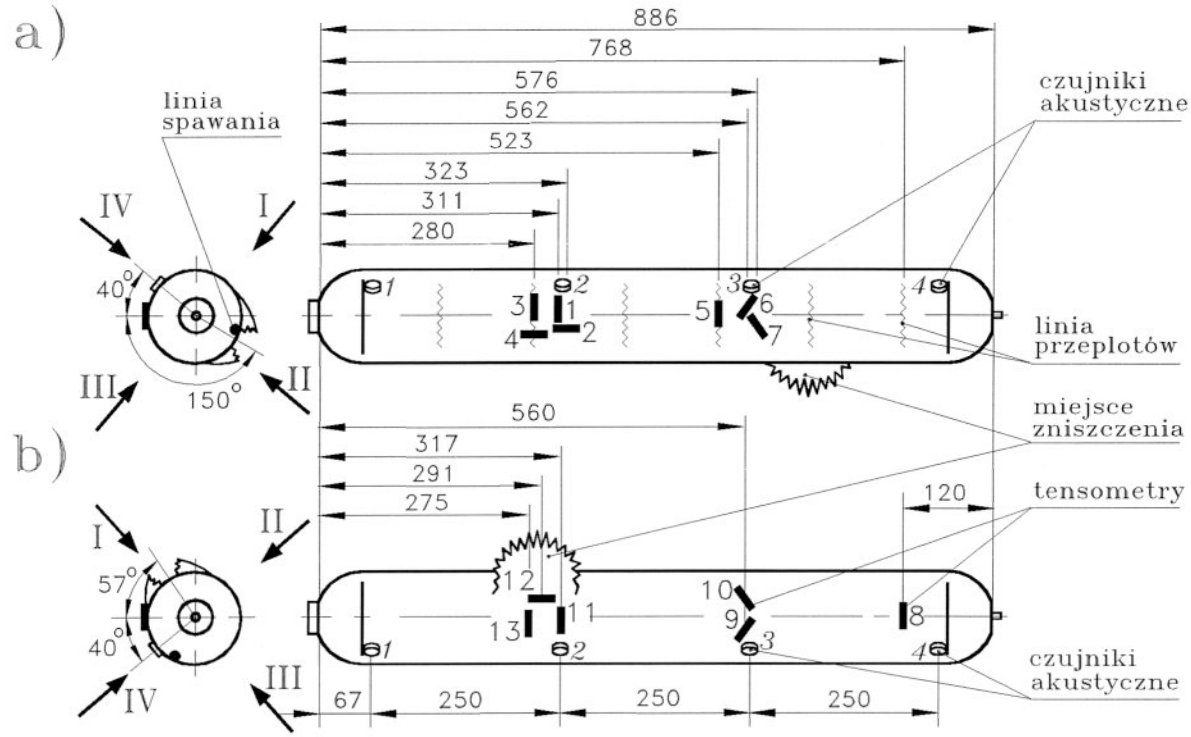
Rysunek 4.35: Wykres przyrostu objętości butli **1** i **2** w funkcji ciśnienia.



Rysunek 4.36: Schemat rozmieszczenia oraz kierunki ułożenia tensometrów na powierzchni butli **3** – a) i **4** – b).

4.4.6 Układ tensometrycznego pomiaru odkształcenia

Zasadniczą część układu pomiaru odkształcenia metodą tensometrii oporowej stanowi mostek tensometryczny, typ AT–970, Nr 31/71r, pokazany na schemacie 4.33 (19). Schemat rozmieszczenia oraz kierunek ułożenia tensometrów na butlach **3** i **4** pokazano na rys. 4.36. W tabeli 4.6 zamieszczono opis mierzonych odkształceń przez kolejne tensometry umieszczone na butlach **3** i **4**. Przy rozmieszczaniu tensometrów kierowano się doświadczeniem wynikającym z wcześniej przeprowadzonych badań ciśnieniowych [15, 24, 94], obliczeniami teoretycznymi [14, 30, 31] oraz zaleceniami zamieszczonymi w [33, 110]. Na butlach, w miejscach umieszczania tensometrów, nałożono warstwę o grubości ok. 0.5 *mm* z elastycznego syciwa epoksydowego produkcji krajowej (żywica EPIDIAN 5 i utwardzacz PAC, zmieszane w proporcjach 1÷1). Użyto tensometry typu RL, 120/6, k = 2.15. Zastosowano półmostkowy układ połączeń tensometrów z kompensacją temperatury. Tensometry 3, 4 i 5 umieszczono na linii zgrupowania przeplotów butli **3** (rys. 4.36). W tych miejscach odkształcenia są mniejsze w porównaniu do miejsc wyznaczonych tensometrami 1 i 2. Uznano za interesujące porównanie odkształceń wymienionych miejsc z odkształceniami butli **4** w miejscach wyznaczonych przez tensometry 8, 11, 12 i 13. Tensometr 8 umieszczono w miejscu wystąpienia największych odkształceń teoretycznych wyznaczonych analitycznie. Kierunki naklejenia tensometrów 6 i 7 na butli **3** oraz 9 i 10 na butli **4** są zgodne z kierunkami nawiniętych wiązek rowingu szklanego ($+54°$ i $-54°$). Tensometry kompensujące temperaturę umieszczono na płytkach laminatu wyciętych z podobnych butli ciśnieniowych. Płytki osadzono na podkładkach tłumiących i przytwierdzono do butli



Rysunek 4.36: Schemat rozmieszczenia oraz kierunki ułożenia tensometrów na powierzchni butli **3** – a) i **4** – b).

4.4.6 Układ tensometrycznego pomiaru odkształcenia

Zasadniczą część układu pomiaru odkształcenia metodą tensometrii oporowej stanowi mostek tensometryczny, typ AT–970, Nr 31/71r, pokazany na schemacie 4.33 (19). Schemat rozmieszczenia oraz kierunek ułożenia tensometrów na butlach **3** i **4** pokazano na rys. 4.36. W tabeli 4.6 zamieszczono opis mierzonych odkształceń przez kolejne tensometry umieszczone na butlach **3** i **4**. Przy rozmieszczaniu tensometrów kierowano się doświadczeniem wynikającym z wcześniej przeprowadzonych badań ciśnieniowych [15, 24, 94], obliczeniami teoretycznymi [14, 30, 31] oraz zaleceniami zamieszczonymi w [33, 110]. Na butlach, w miejscach umieszczania tensometrów, nałożono warstwę o grubości ok. 0.5 *mm* z elastycznego syciwa epoksydowego produkcji krajowej (żywica EPIDIAN 5 i utwardzacz PAC, zmieszane w proporcjach 1÷1). Użyto tensometry typu RL, 120/6, k = 2.15. Zastosowano półmostkowy układ połączeń tensometrów z kompensacją temperatury. Tensometry 3, 4 i 5 umieszczono na linii zgrupowania przeplotów butli **3** (rys. 4.36). W tych miejscach odkształcenia są mniejsze w porównaniu do miejsc wyznaczonych tensometrami 1 i 2. Uznano za interesujące porównanie odkształceń wymienionych miejsc z odkształceniami butli **4** w miejscach wyznaczonych przez tensometry 8, 11, 12 i 13. Tensometr 8 umieszczono w miejscu wystąpienia największych odkształceń teoretycznych wyznaczonych analitycznie. Kierunki naklejenia tensometrów 6 i 7 na butli **3** oraz 9 i 10 na butli **4** są zgodne z kierunkami nawiniętych wiązek rowingu szklanego (+54° i −54°). Tensometry kompensujące temperaturę umieszczono na płytkach laminatu wyciętych z podobnych butli ciśnieniowych. Płytki osadzono na podkładkach tłumiących i przytwierdzono do butli

nr tensometru	mierzone odkształcenie butli **3**
1	obwodowe pomiędzy liniami przeplotów
2	osiowe pomiędzy liniami przeplotów
3	obwodowe na linii przeplotów
4	osiowe na linii przeplotów
5	obwodowe na linii przeplotów
6	wzdłuż wiązek rowingu $+54°$
7	wzdłuż wiązek rowingu $-54°$
nr tensometru	mierzone odkształcenie butli **4**
8	obwodowe
9	wzdłuż wiązek rowingu $+54°$
10	wzdłuż wiązek rowingu $-54°$
11	obwodowe
12	osiowe
13	obwodowe

Tablica 4.6: Zestawienie mierzonych odkształceń dla kolejnych tensometrów butli **3** i **4**.

opaskami gumowymi. Wzmocniony spadek napięcia z mostka tensometrycznego przekazywano do zestawu AMS3 – rys. 4.34c oraz rys. 4.33. Umożliwiło to równoczesną obserwację w czasie trwania badań odkształceń powierzchni butli i efektów EA.

4.4.7 Wyniki pomiarów odkształcenia butli

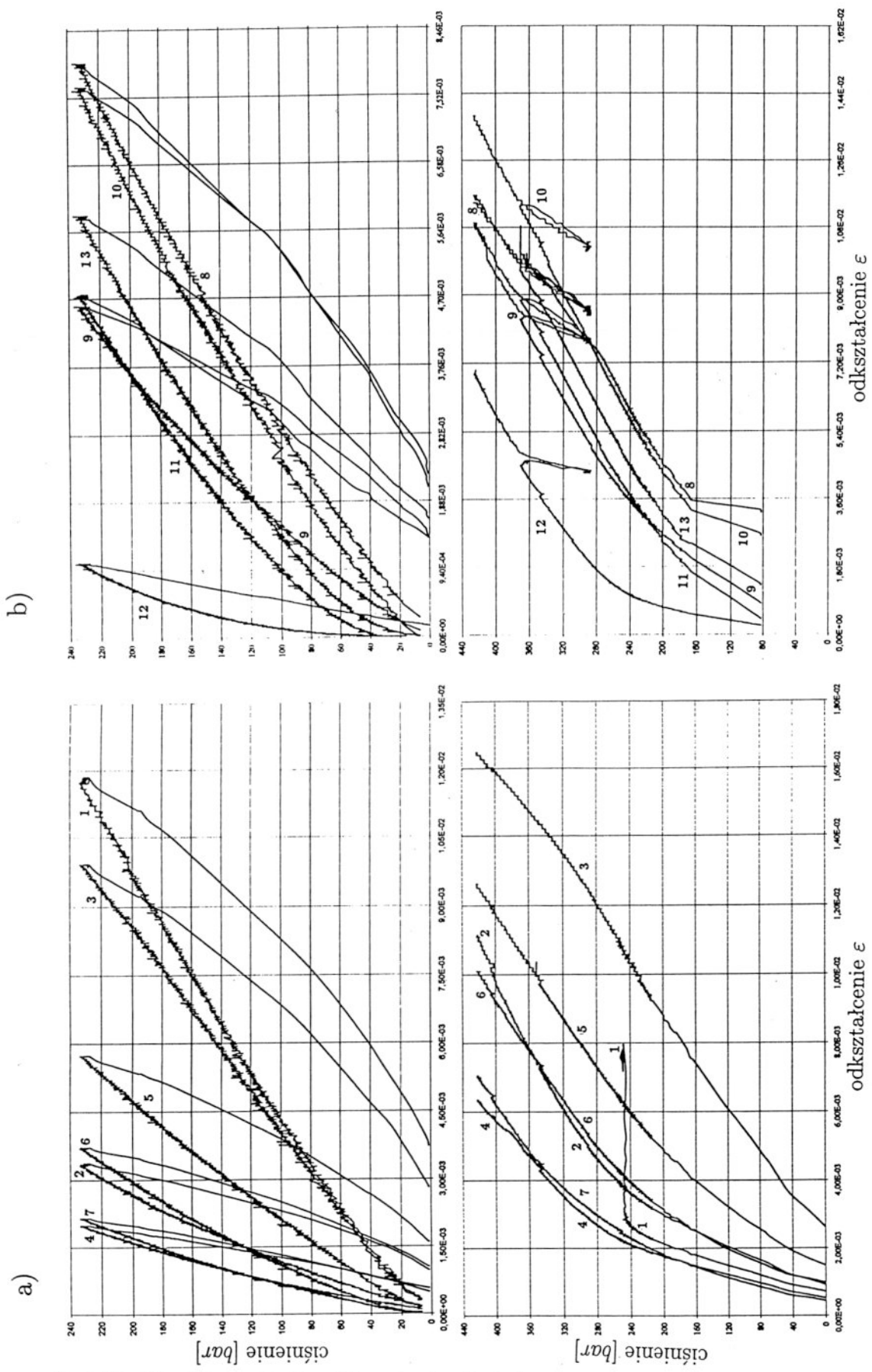
Na rys. 4.37 przedstawiono wykresy odkształcenia butli **3** i **4** w czasie pierwszego i drugiego etapu obciążania. Opis krzywych na wykresach odpowiada oznaczeniom na rys. 4.36 oraz w tabeli 4.6. Największe odkształcenia butli **3** rejestrował tensometr 1. Odkształcenia te były większe od odkształceń tensometru 3, który naklejono na linii przeplotów. Taki wynik jest zgodny z wynikami badań odkształceń metodą interferometrii holograficznej przedstawionymi w punktach 4.2.4 i 4.4.9. Powyższe odkształcenia (butla **3**, tensometry 1 i 3) są znacznie większe od podobnych dla butli **4** (tensometry 8, 11 i 13) o około 50%.

Największe odkształcenia butli **3** rejestrował tensometr 8, który znajdował się w pobliżu połączenia czaszy kulistej z częścią walcową.

Odkształcenia w kierunku wzdłużnym, mierzone przez tensometry 2 i 4 na powierzchni butli **3**, nieznacznie różniły się. Większe rejestrowano w obszarze pomiędzy liniami przeplotów (tensometr 2). Podobnie jak dla odkształceń obwodowych odkształcenia wzdłużne butli **3** są dwa razy większe od odkształceń wzdłużnych butli **4** (tensometr 12).

W kierunkach $+54°$ oraz $-54°$ odkształcenia dla butli **3** i **4** różniły się. Jest to związane z kierunkiem wiązki, która leży bezpośrednio pod tensometrem.

Konstrukcja butli złożona ze stalowego zbiornika wewnętrznego i oplotu ES nie jest dobrym układem ze względu na nośność. Przy ciśnieniu około 170 *barów* (rys. 4.37b w drugim etapie obciążania widoczne jest zakrzywienie wykresu) w stali następują odkształcenia plastyczne. Takie zakrzywienie jest traktowane jako wystąpienie pierwszych uszkodzeń materiału ES, odpowiadające granicy plastyczności w metalach. Również przy ciśnieniu



Rysunek 4.37: Wyniki pomiarów odkształceń z badań tensometrycznych, zależność ciśnienia w pierwszym i drugim etapie obciążania od odkształcenia, a) — butla **3**, b) — butla **4**.

około 170 *barów* obserwuje się nasilenie EA (rys. 4.38). Ciśnienie pracy takiego zbiornika powinno wynosić nie więcej niż 113 *barów* (przy współczynniku bezpieczeństwa 1.5). Ciśnienie to można zwiększyć stosując inny materiał na zbiornik wewnętrzny, np. aluminium lub inne włókno w konstrukcji płaszcza nośnego, np. węglowe.

4.4.8 Wyniki badań EA

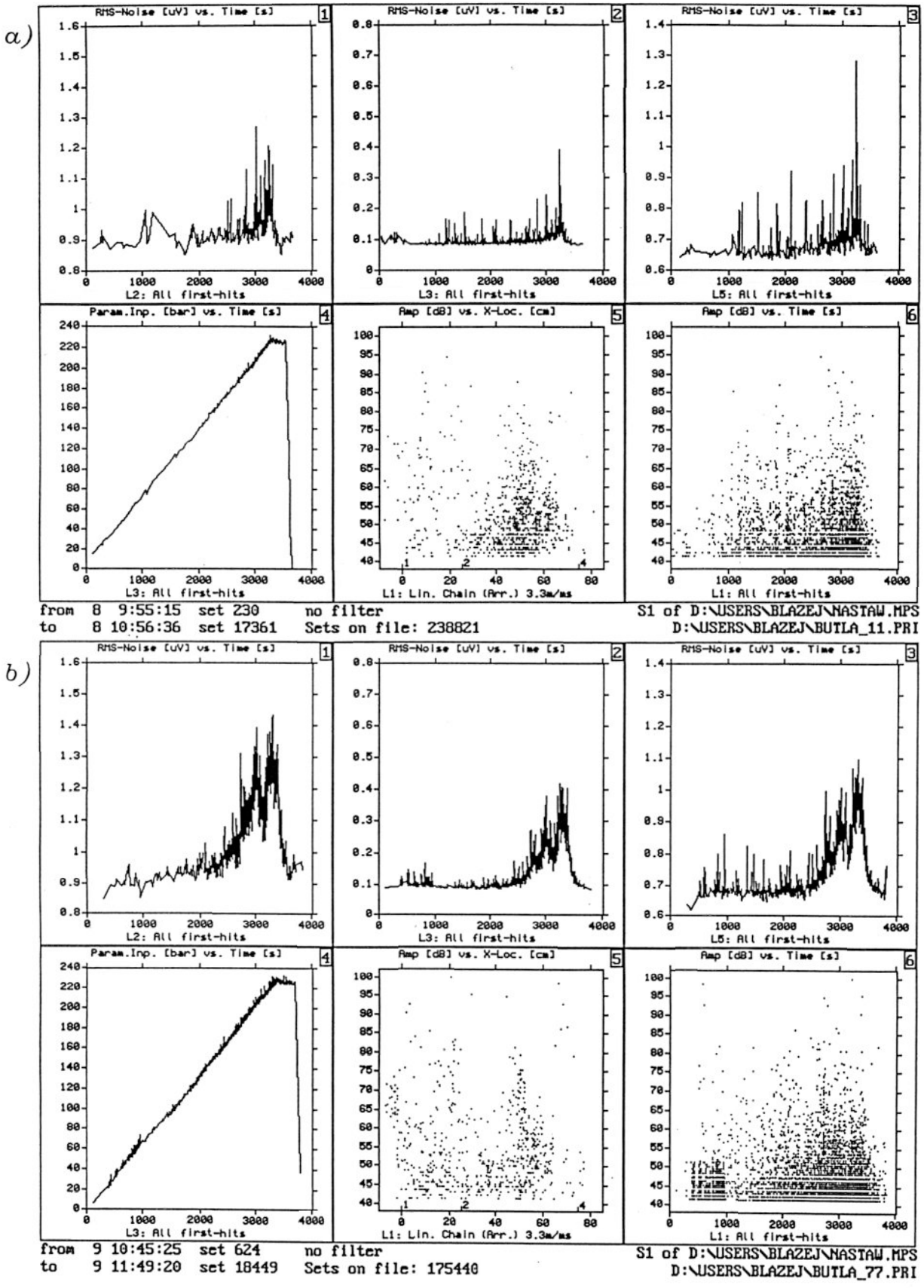
Na podstawie wyników badań EA butli hybrydowych przedstawionych w [20, 22] oraz po pierwszym etapie badań butli **3** i **4** sądzono, iż ich wytrzymałość będzie większa od ciśnienia 450 *barów*. Dla butli hybrydowych po pierwszym etapie obciążania rejestrowano od 130000 do 260000 zdarzeń akustycznych, natomiast dla badanych butli **3** i **4** rejestrowano ich tylko 17361 i 18449. Po drugim etapie obciążania (450 *barów*) dla butli hybrydowych rejestrowano łącznie aż od 801000 do 1227000 zdarzeń akustycznych i był to etap stanowiący ok. 2/3 ciśnienia niszczącego. Natomiast dla badanych butli **3** i **4** zarejestrowano 233385 i 175439 zdarzeń, przy czym dla butli **3** była to liczba zdarzeń zarejestrowana przy zniszczeniu. Przy badaniu butli **3** nie spodziewano się, iż ulegnie ona zniszczeniu już przy 425 *barach*. Dlatego nie przerwano badań i nie zdemontowano czujników akustycznych, przez co jeden z nich uległ uszkodzeniu w czasie rozerwania butli. W badaniach butli **4** używano tylko trzech czujników. Obserwacje dotyczące porównania wyników badań EA butli **3** i **4** prowadzono w obszarze obciążania do ciśnienia 360 *barów*, ponieważ do tego ciśnienia historia obciążania obydwu butli jest identyczna. Pełną historię obciążania butli **3** i **4** w czasie przedstawiono na rys. 4.32. Również przy wykonywaniu wykresów dla butli **3** wyłączano czujnik 3 (aby porównanie wyników EA było dokładniejsze).

Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów w funkcji czasu obciążania butli. W górnej części wykresów wpisano współrzędne oraz jednostki. W opisie wykresów numer wykresu (zamieszczony w górnym, prawym rogu) podano w nawiasach (). W pamięci komputera butlę **3** oznaczono jako 11, natomiast butlę **4** jako 77. To oznaczenie jest widoczne w dolnym, prawym rogu rysunków. W dolnym lewym rogu rysunków widać przedział czasowy, dla którego wykonano wykres (godzina oraz numer zdarzenia). Po środku numer ostatniego zdarzenia akustycznego.

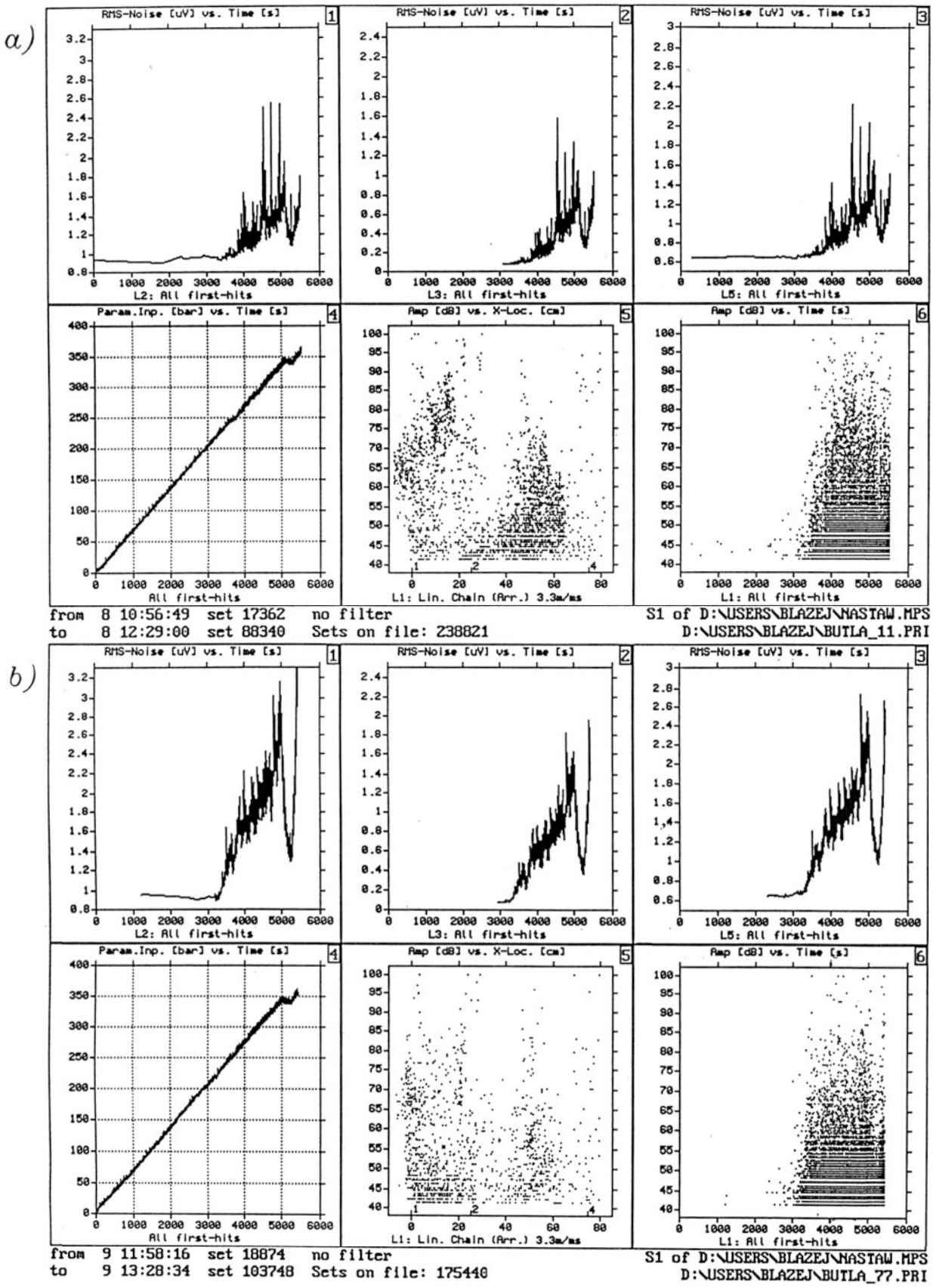
Na rys. 4.38 przedstawiono zestaw wykresów dotyczących pierwszego etapu obciążania butli **3** – a) i butli **4** – b). Etap pierwszy polega na obciążaniu butli do 225 *barów* z prędkością 4 *bary/min*, następnie przetrzymywanie na tym poziomie przez minimum 4 min i zmniejszenie obciążenia do zera – wykres (4).

Na kolejnych wykresach (1), (2) i (3) zamieszczono średnią wartość napięcia skutecznego RMS od czasu (rys. 4.38). Wykresy te pochodzą od czujników 1, 2 i 4. RMS butli **3** pochodzący od czujnika 3 był bardzo podobny do RMS czujnika 2. Krzywa (4) przedstawia zależność panującego ciśnienia w badanej butli od czasu. Można z niego nie tylko odczytać zależność ciśnienia od czasu, ale również intensywność występowania zdarzeń akustycznych. Związane to jest z zagęszczaniem punktów (zdarzeń akustycznych) na lini przyrostu ciśnienia. Takiej właściwości nie posiadają wykresy (4) z rys. 4.39. Wykres (5) ilustruje wielkość występujących amplitud na długości butli. W dolnej części tego wykresu zaznaczono kolejne czujniki. Zależność wartości występujących amplitud w czasie przedstawia wykres (6).

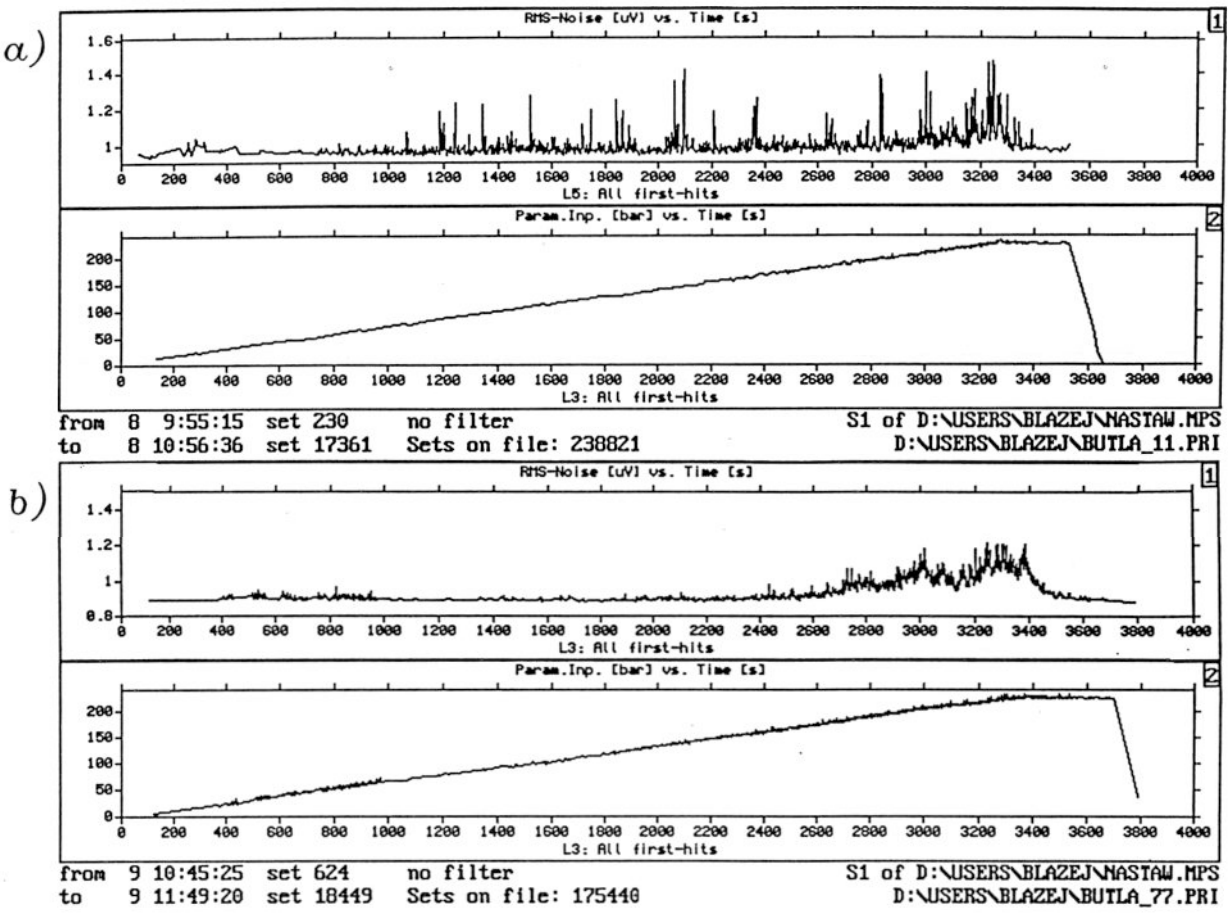
Wyniki pomiaru EA w drugim etapie obciążania butli przedstawiono na rys. 4.39. Początek EA jest trudny do określenia; dodatkowo w butli **4** w początkowym etapie ob-



Rysunek 4.38: Wyniki EA z pierwszego etapu obciążania butli **3** – a) i butli **4** – b). (1), (2) i (3) — RMS (średnia wartość napięcia skutecznego) od czasu dla czujników 1, 2, 4. (4) — zależność panującego ciśnienia w badanej butli od czasu. (5) — wielkość występujących amplitud na długości butli. (6) — zależność wartości występujących amplitud w czasie.



Rysunek 4.39: Wyniki EA z drugiego etapu obciążania butli **3** – a) i **4** – b). Opis kolejnych wykresów podano w poprzednim rysunku.

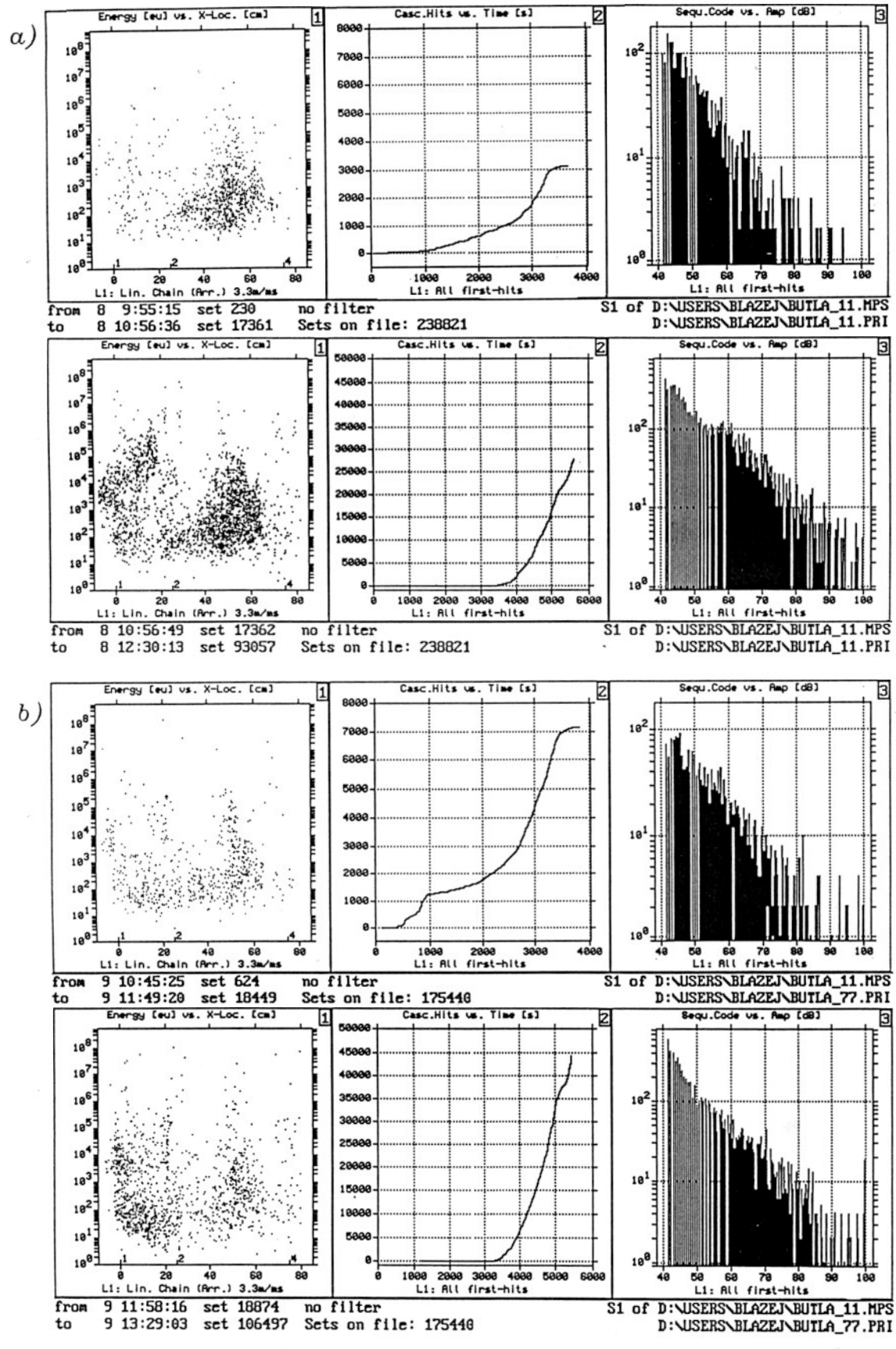


Rysunek 4.40: Wykresy RMS pierwszego etapu obciążania od czasu: a) – czujnik 4 butli **3** oraz b) – czujnik 2 butli **4**. W okolicach tych czujników nastąpiło zniszczenie butli. Wykresy dolne obrazują panujące ciśnienie w butlach.

ciążania (w przedziale od 400 do 1000 s) pojawiły się szumy z zewnątrz, które utrudniają określenie poziomu pierwszej EA. Ustalono dla butli **4**, iż szumy i zdarzenia akustyczne z testów przygotowawczych stanowią pierwsze 3900 zdarzeń zarejestrowanych w pamięci komputera. Dla butli **3** (z czterema czujnikami) ustalono takich zdarzeń 230. Na podstawie rys. 4.40 ustalono początek EA dla butli **3** – 700 s (50 *barów*, ok. 12% obciążenia), natomiast dla butli **4** – 1300 s (90 *barów*, ok. 21% obciążenia). Jest to zgodne z wykresami rys. 4.38a(6) i b(6). Wymienione wyżej wartości odpowiadają pierwszemu hitowi o wartości powyżej 70 dB. Elementy wykonane z długowłóknistego kompozytu ES powinny charakteryzować się początkiem EA większym od 20% wytrzymałości końcowej [8].

Na podstawie porównania wykresów rys. 4.38(4) – poziom wyczekiwania 225 *barów* z wykresami rys. 4.39(4) i rys. 4.41(2) — obciążenie, przy którym pojawia się początek emisji wyznaczono współczynniki „felicity" dla badanych butli. Jest to swoista miara predyspozycji kompozytu do inicjacji i propagacji uszkodzeń. Wynoszą one odpowiednio $f_3 = 0.98$ i $f_4 = 0.97$. Współczynnik ten powinien wynosić ponad f=0.95. Mniejsze wartości są niepożądane [79].

Wygaszanie EA w pierwszym etapie obciążania jest dobre, praktycznie po czasie ok. $1min$ RMS osiąga poziom pojawienia się pierwszej emisji. W porównaniu do wygaszania EA w butlach hybrydowych, w badanych butlach wygaszanie jest znacznie lepsze. W bu-



Rysunek 4.41: Wyniki badań EA butli **3** – a) i **4** – b), pierwszego i drugiego etapu obciążania. (1) — wielkość energii hitów na długości butli, (2) — zależność zmiennej oznaczającej sumaryczną liczbę zdarzeń w kaskadzie zdarzeń od czasu, (3) — sekwencja zdarzeń w pierwszych trzech kanałach według amplitud.

tlach hybrydowych obserwowano znaczną EA na poziomie 225 *barów* po czasie 6 min. Podobnie jak przy butlach hybrydowych obserwowano nieznaczny spadek ciśnienia (ok. 2%) w czasie wyczekiwania. Jest to wynikiem odkształcania się butli, które towarzyszy powstawaniu pęknięć monitorowanych przez malejącą EA.

W pierwszym etapie obciążania można zauważyć znaczną różnicę w wyglądzie wykresów RMS z rys. 4.38, a zwłaszcza a(3) i b(2) – jest to RMS z miejsc gdzie nastąpiło zniszczenie butli. Porównanie tych wykresów przedstawiono na rys. 4.40, lecz w innej podziałce. Wykresy RMS dla butli **3** posiadają chrakterystyczne piki (kaskady) na całej długości krzywej. Widać odbicie tych pików na wykresie a(6), który potwierdza, iż powstały one w skutek zaistnienia szeregu zdarzeń średnioamplitudowych. Może to być interpretowane jako pękanie niektórych włókien zbrojenia, jednak bardziej wiarygodne jest przypuszczenie, iż jest to wynikiem powstawania długich pęknięć pomiędzy liniami zgrupowania przeplotów. Zniszczenie nie mogło nastąpić na linii zgrupowania przeplotów, znajdującej się w końcowej części butli **3** – rys. 4.36, strona 90. Odległość pomiędzy tą linią przeplotów a dennicą butli jest zbyt mała. Nie rozwinęły się tam dostatecznie duże pęknięcia wzdłużne. Takie pęknięcia powstały po obu stronach następnej linii zgrupowania przeplotów, gdzie nastąpiło zniszczenie. Sytuacja taka nie zaistniała w butli **4**, ponieważ średnia długość wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ jest znacznie krótsza w porównaniu do butli **3** oraz przeploty są rozproszone. To zjawisko można obserwować na wykresach rys. 4.41(2). Dla butli **3** zarejestrowano mniej hitów kaskadowych, jednak przez porównanie wykresów rys. 4.41(3) widać, iż zawierają one większą liczbę zdarzeń.

Znalezienie korelacji pomiędzy wykresami RMS (rys. 4.38) i wykresami obciążenia (4), tak jak to przedstawiono na rys. 3.1, strona 38, jest niemożliwe. Można by to uzyskać przy porównaniu wykresów RMS z wykresem przyrostu objętości przy stałym, powolnym wydatku pompy. Wykonanie takiego wykresu jest trudne. Podobne kształty wykresów obserwowano w badaniach ciśnieniowych rur opisanych w [45]. Badane rury były wykonane według struktury N_r1. Powstałe piki na wykresie RMS interpretowano jako zaistnienie pęknięć o wyższej energii. Zastanawiająca jest zaistniała koncentracja zdarzeń w obszarze pomiędzy czujnikami 2 i 4 (rys. 4.38a(5)), gdzie znajdują się tensometry na podłożu z elastycznego syciwa epoksydowego (rys. 4.36). Jednak odrzucono przypuszczenie pojawiania się EA w wyniku odspajania się tego podłoża, ponieważ moduł sprężystości syciwa jest dwa razy mniejszy od modułu osnowy kompozytu ES [29]. Prowadzono również oględziny podłoża tensometrów i czujników akustycznych po badaniach i nie zuważono pęknięć, odspojeń na granicy materiałów czy zabieleń. Sprawdzano również możliwość udarowego usunięcia zsieciowanego syciwa z powierzchni butli i oceniono to jako bardzo trudne. Przypuszcza się, iż omawiane zgrupowanie zdarzeń akustycznych w okolicach czujnika 3 pochodzi z obszaru pomiędzy liniami zgrupowania przeplotów, gdzie akurat EA jest największa. Duże rozproszenie zdarzeń akustycznych świadczy o powstaniu pęknięć daleko od czujników 2 i 4 – rozproszone punkty lokalizacji powstałego defektu. Jest tutaj pewna zgodność z miejscem powstania zniszczenia butli **3**. Zniszczenie powstało dokładnie po przeciwnej stronie do linii rozmieszczenia czujników (rys. 4.36, butla **3**).

Na wykresie rys. 4.38b(5) można zauważyć początek pojawiania się zdarzeń średnio i wysokoamplitudowych w obszarze czujników 1 i 2, gdzie nastąpiło zniszczenie butli **4**. Można również zauważyć zgrupowanie hitów mało i średnio amplitudowych pomiędzy czujnikami 2 i 4. Takie spostrzeżenia potwierdzają wykresy energii na długości butli pokazane na rys. 4.41b(1). Energia wyliczana jest przez scałkowanie podniesionego do

kwadratu przebiegu czasowego zdarzenia. Podawana jest w [eu] – oznacza 10E-14 V^2s na wyjściu sensora. Prawdopodobnie jest to następstwem pojawiania się oddzieleń międzyfazowych włókna i osnowy oraz długich pęknięć pomiędzy liniami przeplotów. Nieznaczny rozrzut tych zdarzeń świadczy o prawdopodobnym powstaniu wady w czasie wykonywania nawoju w miejscu oddalonym o ok. 90° od linii rozmieszczenia czujników, jednak nie wiadomo w jakim kierunku. Jest to wada związana z rozsunięciem się wiązek rowingu. W pierwszym etapie obciążania w butli **3** zaistniało 32 zdarzenia akustyczne powyżej 75 dB, natomiast w butli **4** zaistniało ich tylko 39. Jednak przy uaktywnieniu czujnika 3 w pierwszym etapie obciążania w butli **3** liczba zdarzeń akustycznych powyżej 75 dB wzrasta do 109 (ponad trzykrotnie).

Odejmując liczbę zdarzeń akustycznych związaną z szumami w początku pierwszego etapu obciążania butli **4** (3900 zdarzeń) uzyska się 14549 zdarzeń. Jest to wartość mniejsza o 2582 zdarzenia od liczby zarejestrowanych zdarzeń dla butli **3**. Jak widać z porównania wykresów (3) z rys. 4.41 w pierwszym etapie obciążania w butli **3** zaistniało więcej zdarzeń niskoamplitudowych. Natomiast w drugim etapie obciążania liczba zdarzeń akustycznych zarejestrowana dla butli **4** jest większa o 13896 zdarzeń (rys. 4.39), jednak w butli **3** zaistniało więcej zdarzeń średnio i wysoko amplitudowych – rys. 4.41(3).

Porównując wykresy (5) z rys. 4.39 oraz wykresy (1) z rys. 4.41 można stwierdzić, iż w butli **4** przewidzenie miejsca zniszczenia było możliwe z dostateczną dokładnością. Butla **3** zachowywała się inaczej niż pozostałe butle. Po pierwszym etapie słusznie sądzono, iż ulegnie ona zniszczeniu po przeciwnej stronie czujników 2 i 4. Jednak wykres a(5) rys. 4.39 wskazuje, iż zniszczenie nastąpi w okolicy czujnika 1, gdzie miała miejsce koncentracja zdarzeń średnio i wysokoamplitudowych . Przy uaktywnieniu czujnika 3 koncentracja zdarzeń miała miejsce w części środkowej butli. Należy wspomnieć, że przy badaniach ciśnieniowych wszystkich czterech butli tylko w butli **3** zniszczenie nastąpiło w okolicy linii spawu stalowego zbiornika wewnętrznego (rys. 4.36, strona 90).

Przypuszczano, iż źródłem emisji może być tarcie stalowego zbiornika wewnętrznego i płaszcza nośnego. Jednak przy zmniejszaniu ciśnienia w końcowej fazie pierwszego etapu obciążania butli obserwowano nieznaczną EA.

Z wykresów RMS dla poszczególnych czujników (rys. 4.38 i rys. 4.39 a1, a2 i a3 oraz b1, b2 i b3) można zaobserwować, iż w okolicy dennic butli występuje większy RMS niż w części środkowej. Spostrzeżenie to pokrywa się z wynikami obliczeń analitycznych przedstawionych w załączniku oraz miejscem zniszczenia butli **3**, które występowało właśnie w końcowej części (rys. 4.36). Również badania metodą interferometrii holograficznej oraz badania tensometryczne potwierdzają powyższe spostrzeżenie. Na rys. 4.42 pokazano zdjęcia wszystkich czterech badanych butli. Wydaje się wątpliwa zgodność wykresów RMS (1, 2 i 3) z wykresami lokalizacji (5). Wynika to z zastosowania niezbyt właściwego układu interpretowania występujących zdarzeń akustycznych. Stosowany układ liniowy przeznaczony jest do pomiaru EA w rurociągach. Najlepszym byłby układ specjalnie przeznaczony do badań zbiorników, jednak ze względu na wysoką cenę dostępne oprogramowanie aparatury AMS3 nie jest wyposażone we wspomniany moduł pomiarowy.

Przy obciążaniu wszystkich butli, zwłaszcza w końcowym etapie, można było usłyszeć liczne trzaski kompozytowego płaszcza nośnego. Na podstawie charakterystycznego narastania takich trzasków w sposób wykładniczy można było przewidzieć moment zniszczenia – ok. 15 s przed zniszczeniem. Butla **3** zachowywała się inaczej od pozostałych butli. Jej zniszczenie nie było poprzedzone tak wyraźnymi trzaskami i nastąpiło nagle.

Rysunek 4.42: Zdjęcia czterech badanych butli ułożomych według kolejności.

4.4.9 Oznaczenie przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej

W celu określenia struktury przemieszczeń ścianki badanych butli ES posłużono się metodą interferometrii holograficznej [11]. Opis stanowiska przedstawiono szerzej w punkcie 4.2.4, strona 58. Pomiary prowadzono dla różnych wartości ciśnienia panującego wewnątrz butli. Ciśnienia te wynosiły: 100, 150 i 200 *barów*, a przyrost ciśnienia (ΔP) 4 *bary*.

W obrazie przemieszczeń płaszcza butli **3** wykonanej według nawoju 1/45 jest charakterystyczne, że mniejsze wartości przemieszczeń występują w miejscach gdzie następuje zgrupowanie przeplotów. Przemieszczenia te zmieniają się wzdłuż osi butli, a różnice ich wartości wynoszą nawet 25%. Na tej podstawie można twierdzić, że również właściwości mechaniczne ścianek nośnych tak wykonanych butli zmieniają się wzdłuż osi.

Na podstawie przeprowadzonych badań z pomiarem przemieszczeń ścianki kompozytowych butli wysokociśnieniowych metodą interferometrii holograficznej można stwierdzić, iż rodzaj nawoju i wadliwe ułożenie warstw ma wpływ na nierównomierność przemieszczeń wzdłuż osi butli oraz jej końcową wytrzymałość. Rozkład przemieszczeń zarejestrowany dla nawoju 1/45 wskazuje na występowanie miejscowych przewężeń na długości butli. Rozmieszczenie przewężeń jest zgodne z występowaniem obwodowego zgrupowania przeplotów – rys. 4.36a, strona 90.

4.4.10 Podsumowanie badań butli

Obserwacje porównawcze struktur butli kompozytowych (głównie butli **3** i **4**) wykonanych metodą nawijania pozwalają stwierdzić, iż rozmieszczenie przeplotów ma wpływ na wytrzymałość. Odkształcenia mierzone metodą tensometrii oporowej na powierzchni butli **3** były większe o ok. 30% w porównaniu do butli **4**. Ponadto odkształcenia mierzone na linii przeplotów były mniejsze niż pomiędzy liniami przeplotów (punkt 4.4.7). Podobne obserwacje deformacji butli rejestrowano metodą interferometrii holograficznej. Porównawcze obserwacje wyników badań metodą EA wskazują, iż butla **3** charakteryzuje się większą emisją zwłaszcza zdarzeń średnio i wysokoamplitudowych (rys. 4.41(3)). Kaskady hitów butli **3** pochodzące od długich pęknięć rozchodzących się pomiędzy przeplotami są około dwa razy większe (rys. 4.40.) Zdarzenia akustyczne towarzyszące obciążaniu butli **3** charakteryzowały się większą energią (rys. 4.41(1)). Podobnie jak dla rur ciśnieniowych wyglądy miejsc zniszczenia butli różniły się. Zniszczenie butli **3** z nawojem N_r1 nastąpiło na skrzyżowaniu linii zgrupowania przeplotów i linii spawu wewnętrznego zbiornika stalowego, a także w pobliżu miejsca największych naprężeń. Zniszczenie to jest zorientowane wzdłuż wiązek rowingu i potwierdza sposób pękania zaobserwowany przy rurach ciśnieniowych i skręcanych: linie przeplotów są swoistą barierą dla pojawiających się po obu stronach długich pęknięć. W wyniku spiętrzenia tych pęknięć w obszarze linii zgrupowania przeplotów występuje koncentracja naprężeń, które przyczyniają się do wystąpienia zwiększonej gęstości zlokalizowanej energii. Jeśli energia ta osiągnie stan krytyczny jest to początek zniszczenia.

Uznano za celowe poszerzenie badań o większą liczność próbek, jednak ze względu na duży koszt wykonania butli badania na tym etapie nie mogły być liczniejsze.

Przedstawiony przykład zastosowania metody tablicowej do projektowania płaszcza nośnego butli wysokociśnieniowej wskazuje, iż możliwość doboru nawoju jest ważnym zagadnieniem w programowaniu materiału kompozytowego.

Rozdział 5

Wnioski i uwagi końcowe

1. Opracowano metodę nawijania włókna ciągłego na rdzeń walcowy, zwaną metodą tablicową. Jest to narzędzie pozwalające na dobór nawoju dla elementu kompozytowego.

   - Sformułowana metoda tablicowa systematyki nawijania włókna ciągłego jest sposobem analizy nawijania nie tylko walca, ale również graniastosłupów, stożków, ostrosłupów, kuli i torusa. W załączniku do pracy zamieszczono 52 rysunki tablic oraz nawojów.
   - Metoda ta jest prostsza od spotykanych w literaturze, ponieważ wymaga mniejszej liczby parametrów i podaje pełny zestaw nawojów. Dowolny nawój opisują jedynie dwie liczby np. 11/4 (numer tablicy / numer wiersza). W punkcie 2.3, strona 28 oraz w punktach 4.2.1, 4.3.2, 4.4.1 przedstawiono przykłady praktycznego zastosowania metody tablicowej.
   - Opracowano program komputerowy w celu symulacji nawijania włókna dla wybranych elementów kompozytowych. Umożliwia on obserwację struktury nawoju przed wykonaniem elementu.
   - Zadaniem projektującego element nawijany jest jedynie wybranie nawoju z tablicy oraz odczytanie parametrów nawijania.
   - Zdaniem autora metoda ta pozwoli również na sterowanie nawijarkami w czasie wytwarzania elementów kompozytowych.
   - Na podstawie wstępnej analizy struktury nawoju otrzymanej z programu symulującego można przewidzieć właściwości wytrzymałościowe kompozytowego elementu nawijanego. Postawiono hipotezę, iż rozmieszczenie przeplotów ma wpływ na wytrzymałość kompozytowych elementów nawijanych.

2. W badaniach doświadczalnych zaobserwowano odmienne mechanizmy niszczenia materiału kompozytowego zależnie od rodzaju *struktury nawijania.*

   - Nawoje N_r1 wszystkich tablic mają bardzo niekorzystnie rozmieszczone przeploty. W przypadku zastosowania ich w konstrukcyjnych elementach rurowych, w miejscach zaznaczonych strzałką na rys. 2.7, strona 26 i rys. 4.3, strona 54, następuje załamanie włókien, co powoduje miejscowe odchylenie ich osi od

pierwotnego kierunku. W tych miejscach powstają lokalne strefy o zwiększonych naciskach przeplecionych wiązek. Taka miejscowa zmiana rozkładu naprężeń stanowi rodzaj karbu. W miejscach między strzałkami nie ma przeplotu, co z kolei jest przyczyną występowania długich pęknięć typu *splitting* i rozwarstwień. Dowodem tego są wyniki obserwacji elementów ES przedstawione w pracy, jak również rezultaty badań ciśnieniowych według *SPOSOBU II*. Na powierzchni próbek wykonanych według nawoju N_r1 w czasie obciążania, np. ciśnieniem wewnętrznym, można zauważyć powstawanie pęknięć wzdłuż włókien na powierzchni pomiędzy strzałkami (porównanie rys. 4.3, strona 54 z rys. 4.7, strona 57). Ze wzrostem ciśnienia liczba tych pęknięć rośnie osiągając stan nasycenia, jednak ich długość jest ograniczona liniami przeplotów. Dalszy wzrost ciśnienia prowadzi do złomu na linii przeplotów.

- W obszarze linii zgrupowania przeplotów występuje koncentracja naprężeń wynikająca ze spiętrzenia pęknięć. Naprężenia te przyczyniają się do wystąpienia zwiększonej gęstości zlokalizowanej energii w okolicy przeplotów. W tych miejscach powstają znacznie mniejsze odkształcenia materiału. Zniszczenie w obszarze linii zgrupowania przeplotów obserwowano również w badaniach butli wysokociśnieniowych oraz w badaniach rur na skręcanie. Dodatkowo zauważono podobne typy zniszczeń rur skręcanych z nawojem N_r1 i rur z karbem w postaci otworu kołowego. Również wyniki badań metodą EA wskazują na występowanie długich pęknięć pomiędzy liniami zgrupowania przeplotów i powstanie zniszczenia w obszarze tych linii.
- W nawojach o dużej liczbie przeplotów (nawoje N_r2 i N_r3 z tabeli 4.2, strona 64 i rys. 2.7, strona 26 oraz butla **4**) występują pęknięcia translaminarne pomiędzy *warstwami* przez linie zgrupowania przeplotów. W tych nawojach linia zgrupowania przeplotów jest podzielona i nie może zatrzymać pęknięć powstających wzdłuż wiązek rowingu szklanego (typu *splitting*).

3. Na obecnym etapie badań struktur kompozytowych elementów nawijanych można stwierdzić, iż **najwyższą wytrzymałością charakteryzują się nawoje, których pierwszy numer z grupy jest podzielny przez 4** (np. nawój N_r4, tabela 4.2, strona 64 oraz rys. 2.7, strona 26). Przy takim ułożeniu wiązek w ściance rury ES powstałe pęknięcia nie rozprzestrzeniają się lecz równomiernie wypełniają materiał osiągając stan nasycenia. Pęknięcia nie powodują powstawania miejscowych koncentracji naprężeń jak w nawojach N_r1. Pęknięcia translaminarne powstają w końcowej fazie obciążenia (znacznie później niż w nawojach podzielnych przez liczby <4). Taką właściwość wykazują nawoje zaznaczone okręgiem w zestawieniu tablic nawojów z rys. 2.14, strona 33. Właściwość ta jest również związana z szerokością użytej w badaniach wiązki e, która zależy głównie od rodzaju rowingu (np. $tex1200$). Dla większych szerokości rowingu wskazane nawoje w zestawieniu na rys. 2.14 ulegają przesunięciu w kierunku mniejszych numerów (np. N_r3 lub N_r2, tabela 4.2 oraz rys. 2.7), jednak nie mogą one osiągnąć nawoju N_r1. Należy podkreślić, że zastosowanie wszystkich innych nawojów od N_r1 zmienia charakterystykę pracy kompozytowych elementów nawijanych oraz może zwiększyć jego wytrzymałość nawet o 40%.

Literatura

[1] ARATO L., *Konstruktion und Festigkeit von GFK-Schleuderbehaltern.*, Kunststoffe **63**, 12, 1973.

[2] ASTM D 2290–64 T *Tentative Method of Test for: Apparent tensile strength of parallel reinforced plastics by split disk method.*, s. 465–470.

[3] ASTM D 2585–68 *Standard Test Method for Preparation and tension testing of filament–wound pressure vessels.*, April 1990, s. 106–110.

[4] ASTM E 1118–86 *Standars Practice for AE Examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe (RTRP).*, s. 710–724.

[5] ASTM E 1067–85 *Standars Practice for AE Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels.*, s. 660–679.

[6] BAER H., BRAUN G., *Das rationelle Wickeln von einstuckigen Behaltern und anderen Rotationskorpern mit anspruchsvollen Wickelprogrammen.*, Kunststoffe **59**, 12, 1969.

[7] BAUER W., *Beitrag zur Klarung der Rautenbildung beim Aufspulen von Faden.*, Kunststoffe, **65**, 7, 1975.

[8] BEŁZOWSKI A., *Próby wytrzymałości kompozytowych urządzeń ciśnieniowych – analiza uregulowań krajowych i zagranicznych.*, III Ogólnopolska Konferencja – Kompozyty i Kompozycje Polimerowe. Szczecin – Świnoujście, 16 – 18 czerwca 1997, s. 201–206.

[9] BEŁZOWSKI A., *O praktycznych aspektach badań nad kinetyką rozwoju pęknięć poprzecznych w kompozytach warstwowych.*, I Konferencja – Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Kozubnik 25 – 27, październik 1995.

[10] BEŁZOWSKI A., *O możliwościach zastosowania światłowodów do wykrywania uszkodzeń w kompozytach polimerowych.*, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, III Konferencja Naukowo-Techniczna, Ustroń 6 – 9 październik, 1996, s. 1–8.

[11] BĘDZIŃSKI R., *Badania modelowe wybranych węzłów konstrukcyjnych metodą elastooptyczną i interferometrii holograficznej.*, Prace Naukowe Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.05., temat nr 02.02.03, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 1990.

[12] BIERNACKI B., BOGDANIUK M., OSTASZEWSKI K., *Podstawy teoretyczne obliczania i stateczności rur nawijanych z kompozytów polimerowych.*, projekt badawczy nr 33/94, Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Gdańsk 1994.

[13] BŁAŻEJEWSKI W., TRACZEWSKI A., *Elementy kompozytowe o podwyższonej odporności na narażenia w warunkach napowietrznych.*, II Seminarium Techniczne, *Materiały i układy elektroizolacyjne.*, Ustroń – Jaszowiec 26 – 28, kwiecień 1995.

[14] BŁAŻEJEWSKI W. *Badania nad mechaniką zbrojenia i technologią wytwarzania naczyń wysokociśnieniowych na przykładzie lekkich butli lotniczych.*, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr 500/2730/26, Wrocław 1995.

[15] BŁAŻEJEWSKI W., *Kompozyt długowłóknisty jako programowalny materiał butli wysokociśnieniowaj.*, XVII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka koło Warszawy, 17 – 19, październik 1996, s. 87–92.

[16] BŁAŻEJEWSKI W., *Zasady projektowania elementów kompozytowych na przykładzie rur wysokociśnieniowych.*, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr 500/4920/26, Wrocław 1996.

[17] BŁAŻEJEWSKI W., *Wybór nawoju metodą tablicową na przykładzie skręcanych rur ES.*, III Ogólnopolska Konferencja – Kompozyty i Kompozycje Polimerowe, Szczecin – Świnoujście, 16 – 18 czerwca 1997, s. 221–222.

[18] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., MYSZKA W., *Badania rur ES przy skręcaniu z wykorzystaniem EA.*, raport IMMT, III Letnia Szkoła Mechaniki Pękania, Szklarska Poręba 22 – 28 czerwca 1997.

[19] BŁAŻEJEWSKI W., *Ciśnieniowe badania niszczące kompozytowych rur nawijanych.*, VI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Politechnika Świętokrzyska, **62**, Kielce – Ameliówka 22 – 24, wrzesień 1997, s. 43–50.

[20] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., *Nieniszczące badania ciśnieniowe butli epoksydowo-szklanych z wykorzystaniem EA.*, raport IMMT, Wrocław 1997.

[21] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., *Ocena stanu kompozytu epoksydowo-szklanego metodą EA.*, XVII Sympozjum Zmęczenia i Mechaniki Pękania Materiałów i Konstrukcji, Bydgoszcz – Pieczyska, Maj, 1998, s. 27–32.

[22] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., GASPEROWICZ A., TRACZEWSKI A., *Badania butli wysokociśnieniowych z kompozytowym oplotem hybrydowym metodą EA.*, III Konferencja Naukowo–Techniczna, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń, 6 – 9 październik 1998, tom II, s. 61–68.

[23] BŁAŻEJEWSKI W., NARBUDOWICZ K., *Metoda tablicowa w projektowaniu kompozytowych elementów nawijanych.*, III Konferencja Naukowo-Techniczna, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń, 6 – 9 październik 1998, tom I, s. 241 i 242.

[24] BŁAŻEJEWSKI W., FILIPIAK J., *Odkształcenia kompozytowych butli wysokociśnieniowych.*, III Konferencja Naukowo–Techniczna, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń, 6 – 9 październik 1998, tom I, s. 243 i 244.

[25] BŁAŻEJEWSKI W., FILIPIAK J., *Odkształcenia nawojów w epoksydowo-szklanych elementach kompozytowych.*, XVIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka koło Warszawy, 17 – 19, październik 1998, s. 155–160.

[26] BŁAŻEJEWSKI W., *Typy niszczenia kompozytowych butli wysokociśnieniowych.*, VI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Politechnika Świętokrzyska, Kielce/Cedzyna 23 – 25, wrzesień 1999,

[27] BORKOWSKI M. *Wpływ składu i struktury tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem ciągłym na niektóre własności mechaniczne kompozytu.*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny, Warszawa 1978.

[28] BOŻYŃSKI M., *Wpływ struktury wzmocnienia – gęstości i rozmieszczenia przeplotów na wytrzymałość nawijanych rur ES.*, praca dyplomowa, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 1998.

[29] BROJER Z., HERTZ Z., PENCZEK P., *Żywice epoksydowe.*, WNT, Warszawa 1982.

[30] BRYCZKOWSKI Z., *Analiza naprężeń płaszcza nośnego kompozytowej butli wysokociśnieniowej.*, III Konferencja Naukowo–Techniczna, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń, 6 – 9 październik 1998.

[31] BRYCZKOWSKI Z., *Obliczenia wytrzymałościowe konstrukcji z materiałów kompozytowych na przykładzie zbiorników wysokociśnieniowych.*, praca dyplomowa, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław 1998, tom I, s. 241 i 242.

[32] BULMANIS W.N., *Wariant strukturnoj modeli razruszenia armirowannych namotnych kompozitow.*, Mechanika kompozitnych materiałow., 1982.

[33] BURR S.T., IFIU P.G., MORRIS D.H., *A method for determining critical strain gage size in anisotropic materials with large repeating unit cells.*, Experimental techniques, 1995, s. 25–27.

[34] CALCOTE Lee R., *The Analysis of laminated composite structures.*, Van Nostraned Reinhold Company, New York, 1969.

[35] CHERFAOUI M., HERVE CETIM C., THIAM S.N.E.A.(P), X. DUFOUR S.B.P.I., *Developpement de methodes de controle des structures composites.*, Composites – **1**, Janvier–Fevrier 1989.

[36] COHEN D., LOWE K.A., *The influence of epoxy matrix properties on delivered fiber strength in filament wound composite pressure vessels.*, Hercules Aerospace Co., Magna, UT, USA, Journal of Reinforced Plastics and Composites, **10**, 2, March 1991, s. 112–131.

[37] DĄBROWSKI H., *Wstęp do mechaniki materiałów kompozytowych.*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.

[38] DRYŚ B., *Zbiorniki na ciekły azot z kompozytu organicznego.*, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr 59058005026903888, Wrocław 1981.

[39] ECKOLD G.C. *A design method for filament wound GRP vessels and pipework.*, Composites, **16**, 1, 1985, s. 41–47.

[40] EISENBLATTER J., JAX P., SCHWALBE H.J., *A Survey of AE Research in Europe and Investigations Conducted at Battelle–Frankfort.*, **2** AE Symp., Tokyo, Sept. 2 – 4, 1974.

[41] FIGIEL A., *Analiza procesów pękania laminatów poliestrowo–szklanych w warunkach obciążenia długotrwałego i środowiska korozyjnego.*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska 1988.

[42] FUWA M., HARRIS B., BUNSELL A.R., *AE during Cyclic Loading of Carbon–Fibre–Reinforced Plastics.*, J. Phys. D.: Appl. Phys. **8**, 13, Sept. 1975, s. 1460–1471.

[43] FUWA M., BUNSELL A.R.,HARRIS B., *Tensile Failure Mechanisms in CFRP.*, J. Mat. Sci., **10**, 12, Dec. 1975, s. 2062–2070.

[44] FUWA M., BUNSELL A.R., HARRIS B., *AE Studies of Filament–Wound Carbon Fibre Reinforced Rings and Pressure Vessels.*, J. Strain Anal., **11**, 2, April 1976, s. 97–101.

[45] FRANCOIS D., GOŁASKI L., *Joint seminary on failure of advaced materials.*, Paryż 14 – 15 listopad 1994.

[46] GODOWSKI W., RODZIEWICZ M., *Zastosowanie ultradźwięków do badań kompozytów polimerowych.*, XVII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka koło Warszawy, 17–19 październik 1996, s. 204–209.

[47] GOŁASKI L., KUMOSA M., HULL D., *AE Testing of Filament Wound Pipes Under Repeated Loading.*, J. Acoustic Emission, **2**, 1982, s. 95–101.

[48] GRAYSON M., *Encyklopedia of composite materials and composites.*, Joha Wiley & Sons, New York, 1983.

[49] GARRETT K. W., BAILEY J.E., *Multiple transverse fracture in 90° cross-ply laminates of a glass fibre-reinforced polyester.*, Journal of materials science **12**, 1977, s. 157–168.

[50] HAMSTAD M. A., *A Review: AE, a Tool for Composite – Materials Studies.*, Experimental Mechanics, March 1986, s. 7–13

[51] HAMSTAD M.A., CHIAO T.T., *A.E. Produced during Burst Tests of Filament–Wound Bottles.*, J. Comp. Mat., **7**, 3, July 1973, s. 320–332.

[52] HANCOX N.L. *Fibre composite Hybrid Materials.*, Applied Science publishers, London 1981.

[53] HINTON Y.L., SHUFORD R.J., HOUGHTON W.W., *AE during Cure of FRC.*, Characterization of Composite Materials, Army Mat. and Mech. Res. Ctr., Watertown, MA AMMRC MS-82-3, May 1982, s. 23–36.

[54] HOLT J., WARTHINGTON P.J., *A Comparison of Fatigue Demage Detection in Carbon Fiber / Epoxy and Glass Fiber /Epoxy Composite Materials by AE.*, Int. J. Fatigue **3**, 1, Jan 1981, s. 31–35.

[55] HYLA I., *Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałów kompozytowych.*, PWN, Warszawa 1978.

[56] HYLA I., *Elementy mechaniki kompozytów.*, Politechnika Śląska, skrypt Nr 1945, Gliwice 1995.

[57] IZBICKA J., BRZOZOWSKI M., Politechnika Szczecińska, Instytut Polimerów, *Nieniszczące badanie kompozytów polimerowych na podstawie analizy EA.*, **10**, Polimery, 1993, s. 441–448.

[58] JANCELEWCZ B., PASIERSKI J., SAŁBUT L., *Badania ograniczeń odkształcalności poprzecznej polimerowych kompozytów wielowarstwowych poprzez warstwy zbrojone jednokierunkowo.*, XVII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego. Jachranka koło Warszawy, 17 – 19 październik 1996, s. 230–236.

[59] JANCELEWCZ B., STRAUSS V., *Badania wpływu pojedynczego obciążenia ściskającego na wyniki oceny jakości kompozytów polimerowych przy użyciu spektometrii dielektrycznej.*, XVII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka koło Warszawy, 17–19 październik 1996, s. 237–242.

[60] JERZYK I., *Wytrzymałość zmęczeniowa rur z kompozytu epoksydowo–szklanego z anizotropią konstrukcyjną.*, praca doktorska, IMMT, 1984.

[61] JONES D.T., JONES I.A. and Middleton *Improving composite lay-up for nonspherical filament-wound pressure vessels.*, Composites, **27 A**, 1996, s. 311–317.

[62] KAYSZ G., *Razruszehie polimerow.*, Mir, Moskwa, 1981.

[63] KLEINER W., LUSSMANN W., *Ermittlung charakteristischer Werkstoffkenngrossen zum Berechnen von GFK–Wickelstrukturen unter betriebgerechten Bedingungen.*, Kunststoffe, **12**, 59, 1969.

[64] *Know how – development*, Composites, **24**, 1998, s. 59–60.

[65] KRÓLIKOWSKI W., *Żywice i laminaty poliestrowe.*, WNT, Warszawa 1986, s. 570–600.

[66] KRÓLIKOWSKI W., *Tworzywa wzmocnione i włókna wzmacniające.*, WNT Warszawa 1988,

[67] LAROCHE D., BUNSELL A.R., *Stress and Time Dependent Damage in CFRP.*, Adv. in Composite Materials; ed. Bunsell A.R., Bathias C., Martrenchar A., Menkes D., Verchery G., Pergamon press, Oxford – NY 2, 1980, s. 985–977.

[68] LIPSKI W., MAREK W., *Analiza kombinatoryczna.*, Biblioteka matematyczna, **59**, PWN, Warszawa 1986, s. 68–79.

[69] LLOYD D.J., TANGRI K., *AE from Al_2O_3 – Mo Fibre Composites.*, J. Mat. Sci. **9**, 3, March 1974, s. 482–486.

[70] LOSSIE M., VAN BRUSSEL H., *Design principles in filament winding.*, Composites Manufacturing, **5**, 1, 1994, s. 5–13.

[71] LU T.J., JI X., GU X.R. *The effect of resin properties on the strength of filamentary structures.*, Journal of strain analysis, **24**, 2, 1989.

[72] LUBIN G., SHIBLEY A.M., *Handbook of Fiberglass and Advanced plastics Composites.*, Plastics Technical Information Center Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, Van Nostrand Reinhold, 1969, s. 438.

[73] LUBIN G. it Sprawocznik po kompoziczionnym materialam., tom I i II, (tłumaczenie z angielskiego: *Handbook of composites.*) Moskwa, 1988.

[74] Materiały reklamowe firmy LUXFER, z wypisem norm: brytyjskiej BS5045, HSE-AL-FW2, oraz wymagań niemieckich RW TUV i szwajcarskich SVDB, 1997.

[75] ŁUCZAK M., *Opracowanie i wytwarzanie rur izolacyjnych do wyłącznika W–50 według patentu IEL 99621.*, IEL/OW dokumentacja techniczna nr 7701811302600798, Wrocław 1981.

[76] ŁUCZAK M., *Nawijanie elementów rurowych z włókna szklanego ciągłego, Kryteria teoretyczne.*, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr 97180050269003786, Wrocław 1980.

[77] ŁUCZAK M., *Opracowanie technologii produkcji rur w stanie nieobrobionym na osłony biegunów włącznika SCI-4.*, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr 77018108026000, Wrocław 1979.

[78] ŁUCZAK M., *Opracowanie kryteriów ocen, metodyki badań i danych wyjściowych do technologii i konstrukcji elementów izolacyjno-konstrukcyjnych wykonanych z włókna szklanego nasyconego kompozycjami z żywic epoksydowych.*, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr NCR VII – 42.2, Wrocław 1974.

[79] MALECKI I., RANACHOWSKI J., *Emisja akustyczna.*, PAN, Warszawa 1994, s. 269–289.

[80] Mały Poradnik Mechanika, WNT Warszawa, 1984.

[81] MUC A. *Analiza stateczności i deformacji kompozytowych dennic zbiorników ciśnieniowych.*, monografia 135, Politechnika Krakowska, 1992.

[82] NOWAK M., JERZYK I., *Wytrzymałość zmęczeniowa rur z laminatu epoksydowo–szklanego.*, Archiwum nauki o materiałach, **7**, 1, 1986, s. 27–45.

[83] NOWAK M., *Wytrzymałość tworzyw sztucznych.*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1987.

[84] OCHIAI S.I., LEW K.Q., GREEN J.E., *Instrumentad Impact Testing of Structural F.R.P. Sheet Materials and the Simultaneous AE Measurements.*, J. Acoustic Emission **1**, 3, July 1982, s. 191–192.

[85] OLD C.F., CHARLESWORTH J.P., *The Breaking Strain of Nb_3Sn in a Multifilamentary Superconohiecter.*, Cryogenics **16**, 8, Aug. 1976, s. 469–471.

[86] OWEN M.J., *Ustalost ugleplastikov* (tłumaczenie z angielskiego: *Composite Materials*, **5**, *Fatigue and Fracture*), Izd. Mir, Moskwa 1978, s. 363–393.

[87] PABINOWICZ A.L., *Wwiediennie w mechaniku armirowannych polimerow.*, Izd. Nauka, Moskwa 1970.

[88] PARVIZI A., BAILEY J.E., *On multiple transverse cracking in glass fibre epoxy cross-ply laminates.*, Journal of materials science **13**, 1978, s. 2131–2136.

[89] PIĄTEK M., *Teoretyczne podstawy nawijania elementów rurowych z włókna ciągłego splotem skrzyżowanym przy użyciu jednej wiązki.*, Polimery, **9**, 1992, s. 412–417.

[90] PIKOŃ A., *AutoCAD*, Helion, Gliwice 1991.

[91] PUCK A., *Zur Beanspruchung und Verfomung von Mehrschichtenverbund–Bauelementen.*, Kunststoffe, **57**, nr 1, 7, 1967, s.284–293, 573–584, 965–1004.

[92] PUCK A., *Festigkeitsberechnung an Glasfaser/Kunststoff-Laminaten bei zusammengesetzter Beanspruchung.*, Konststoffe, **59**, 11, 1969, s. 780–787.

[93] QIAN L., YUAN R., *Identification of strength parameters for a high-pressure Vessel wound by fibre reinforced composite materials.*, Proc. Instn. Mech. Engrs., **211 E**, 1997, s. 209–213.

[94] Raporty z badań prowadzonych przez WSK-Świdnik na lekkich kompozytowych butlach lotniczych produkowanych w IEL/OW. (Szereg badań niszczących z tensometrycznymi pomiarami odkształceń oraz próby na przestrzelenie i długocyklowe próby ciśnieniowe).

[95] REIFSNIDER K., *Fatigue behaviour of composite materials.*, Inter. J. of Fracture, **16**, 6, 1980, s. 563–583.

[96] RICHARDSON M.O.W., WISHEART M.J., *Review of low–velocity impact properties of composite materials.*, Composites, **27 A**, 1996, s. 1123–1131.

[97] ROSATO D.V., GROVE C.S. *Namotka stiekłoplastikow.*, tłumaczenie z angielskiego: *Filament winding.*, Moskwa 1969.

[98] ROTEM A., *Effect of Strain Rate on AE from Fibre Composites.*, Composites **9**, 1, Jan. 1978, s. 33–36.

[99] ROTEM A., BARUCH J., *Determining the Load - Time History of Fibre Composite Materials by AE.*, J. Mat. Sci. **9**, 11, Nov. 1974, s. 1789–1796.

[100] ROTHWELL R., HARRIS B., *Same Properties of Mixed Fibre CFRP.*, Composites, **9**, July 1978, s. 149–152.

[101] ROTHWELL R., ARRINGTON M. *AE and Mieromechanical Debond Testing.*, Nature Physical Science, **233**, 43, Oct. 1971, s. 169–164.

[102] RUSIŃSKI E., *Metoda elementów skończonych system COSMOS/M.*, PWN, Warszawa, 1992.

[103] SCHOLLIERS J., VAN BRUSSEL H., *Computer-integrated filament winding: Computer-integrated design, robotic filament winding and robotic quality control.*, Composites Manufacturing, **5**, 1, 1994, s. 15–23.

[104] SCHULTE K., REESE E., CHOU T.-W., *Fatigue Behaviour and demage development in woven fabric composites.*, DFVLR, D 5000 Koln 90, Germany 1986.

[105] SCHULZ U., *Schaden an biaxial-gewickelten Behaltern aus glasfaserverstarktem Kunststoff.*, Kunststoffe **63**, 2, 1973, s. 83–85.

[106] SELDEN P.H., *Glasfaserverstärkte kunststoffe.*, Springer–Verlag, Berlin · Heidelberg · New York, 1967.

[107] SIMS G.D., DEAN G.D., READ B.E., WESTERN B.C., *Assessment of Damage in GRP Laminates by Stress Wave Emission and Dynamic Mechanical Measurements.*, J. Mat. Sci. **12**, 11, 1977, s. 2329–2342.

[108] SOHI M.M., *Compressive Strength and Modes of Failure in Polymeric Composites.*, rozprawa naukowa, EMA Journal Announcement: 9106, Washington University, 1991.

[109] SRINIVANSAN R., KARANDIKAR H.M., MISTREE F., *Understanding design-manufacture interaction using compromise decision support problems., I. A formulation for composite pressure vessels.*, s. 679–692, *II. Preliminary synthesis of composite pressure vessels.*, s. 693–703, *III. Design for manufacture of composite pressure vessels.*, s. 705–717, Syst. Design Lab., Houston Univ., TX., USA, Computers and Structures **40**, 3, 1991.

[110] *Strain gage applications on composites.*, wskazówki i zalecenia firmy Measurements Group WISHAY, 1988.

[111] SWINDLEHURST W.E., *AE from Brittle Solids; Spec number: Akustisk emission.*, MTRYD (2), 1978, s. 55–62.

[112] TIMOSCHENKO S., WINOWSKY–KRIEGER S., *Teoria płyt i powłok.*, tłumaczenie z angielskiego, Arkady, Warszawa 1962.

[113] TRĘBALA B., KOWALCZYK M., *Komin z tworzywa.*, Przegląd budowlany, **7**, 1993, s. 18–20.

[114] URZĄD DOZORU TECHNICZNEGO, *Warunki techniczne dozoru technicznego, Urządzenia ciśnieniowe.*, Wydawnictwo Poligraficzne Bydgoszcz 1991 oraz *Zbiorniki przenośne, Zbiorniki stałe.*, Wydawnictwo Prawnicze, Warszawa 1991.

[115] WALCZAK K., *Wytrzymałość ciśnieniowa rur laminatowych poliestrowo-szklanych.*, III Międzynarodowa konferencja SIMPLAST–88, *Tworzywa sztuczne w nauce i technice.*, Kozubnik 10 – 13 paźdz.1988

[116] WARD I.M., *Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych.*, PWN, Warszawa, 1975

[117] WILCZYŃSKI A.P., *Polimerowe kompozyty włókniste.*, WNT, Warszawa 1996.

[118] WILCZYŃSKI A.P., *Mechanika Polimerów w praktyce konstrukcyjnej.*, WNT, Warszawa 1984.

[119] WILD P.M., VICKERS W.G. *Analysis of Filament–wound Cylindrical shells Under combined Centrifugal, pressure and loading.*, Composites, **28 A**, 1997, s. 47–55.

[120] Instrukcja obsługi zestawu AMS3 firmy VALLEN, IMMT.

[121] VALENTIN D., BUNSELL A.R., *A study of damage accumulation in carbon fibre reinforced epoxy resin structures during Mechanical loading monitored by acoustic emission.*, Journal of reineorced plastics and composites, October 1982, s. 314–334.

[122] VALENTIN D., BUNSELL A.R., *Damage detection in carbon fibre epoxy structures using acoustic emission.*, Composite structures, **2**, 1983, s. 40–52.

[123] ZIÓŁKOWSKI B., *Charakterystyki trwałości zmęczeniowej belek przekładkowych z TWS przy wymuszeniach kinematycznych.*, praca doktorska, IMMT, 1982.

Podziękowania:

Autor pracy składa podziękowania
Panu prof. dr hab. inż. Wacławowi Kasprzakowi za pomoc merytoryczną.
Wszystkim pracownikom
Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej
Politechniki Wrocławskiej, Promotorowi,
Panu prof. dr hab. inż. Radosławowi Iwankiewiczowi, za wyrozumiałość i cierpliwość,
Panu dr inż. Andrzejowi Pszonce za poświęcenie i pomoc w rozwijaniu badań metodą EA,
Panu dr hab. inż. Jerzemu Kalecie za pomoc w rozwiązywaniu problemów organizacyjnych i merytorycznych,
Panu Janowi Orłowskiemu i Panu mgr inż. Karolowi Baranowskiemu za pomoc w budowie stanowisk badawczych.
Autor dziękuje wszystkim pracownikom
Instytutu Elektrotechniki we Wrocławiu, a w szczególności
Panu inż. Mieczysławowi Łuczakowi za wprowadzenie w zagadnienie wytwarzania nawijanych elementów ES,
Pani dr inż. Aleksandrze Gasperowicz i kolegom z Pracowni ZT/TK oraz pracownikom warsztatu.

INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI
ODDZIAŁ TECHNOLOGII
I MATERIAŁOZNAWSTWA
ELEKTROTECHNICZNEGO

Wojciech Błażejewski

Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego.

Załącznik

do pracy doktorskiej

Promotor
Dr hab. inż. Radosław Iwankiewicz prof. nadzw. P.Wr.

Wrocław 1999

Spis treści

1 Analiza stanu naprężenia **3**

1.1 Obliczenia wytrzymałościowe butli według założeń makroskopowych . . . 4

1.2 Obliczenia butli kompozytowej metodą elementów skończonych (MES) . . 8

1.3 Analityczne obliczenia wytrzymałościowe butli 11

2 Zestaw tablic z widokami nawojów **12**

2.1 Wprowadzenie 12

2.2 Wybrane przykłady nawijania brył regularnych 13

2.2.1 Nawijanie kuli 13

2.2.2 Nawijanie torusa 15

2.2.3 Nawijanie stożka 17

2.3 Opis danych wejściowych 19

2.4 Pełny zestaw tablic z widokami nawojów dla liczby wiązek na obwodzie rdzenia od 2 do 53 22

Wprowadzenie

W niniejszym załączniku zamieszczono głównie materiał graficzny wygenerowany przez program komputerowy wykonany w ramach pracy doktorskiej i przedstawiony na stronie 34 pracy. W rozdziale 2 pracy opisano szczegółowo metodę tablicową oraz zasady korzystania z przedstawionych w załączniku tablic i widoków nawojów.

Ze względu na zbyt obszerny materiał zawarty w pracy oraz mały związek z przyjętym zakresem pracy zdecydowano się na zamieszczenie w załączniku również opisu i wyników obliczeń analitycznych wybranych elementów kompozytowych, badanych w pracy (butle). Porównano wyniki obliczeń oraz omówiono je w odniesieniu do wyników uzyskanych z badań doświadczalnych.

Literaturę cytowaną w załączniku (liczby w nawiasach kwadratowych) zebrano w części końcowej pracy. W części początkowej pracy zamieszczono także zestawienie oznaczeń oraz terminologię.

Niniejszy załącznik można traktować jako katalog nawojów możliwych do osiągnięcia przy odpowiednich nastawach nawijarki. Zamieszczone w załączniku widoki nawojów mogą być przydatne w procesie projektowania i wykonywania metodą nawijania, np. rur, butli i innych elementów kompozytowych.

Rozdział 1

Analiza stanu naprężenia

Zastosowanie materiałów kompozytowych do wykonania odpowiedzialnych konstrukcji nośnych spowodowało, że problem wytężenia niejednorodnych materiałów anizotropowych stał się w ostatnich latach jednym z węzłowych zagadnień w zakresie badań i zastosowań kompozytów. Jak wspomniano we wstępie do pracy, w powyższym problemie można wyróżnić dwie klasy zagadnień:

- badanie mikromechaniki, warunków zniszczenia poszczególnych składników,
- makroskopowe traktowanie materiału kompozytowego.

Rozważania mikromechaniki, oparte o analizę pól naprężeń w materiale, zjawisk i postaci zniszczenia struktury materiału mają na celu wyjaśnienie przyczyn niszczenia materiału oraz powodujących je czynników. Zachowywanie się materiałów składowych kompozytu w skali mikromechaniki jest bardzo trudne do opisania ze względu na dużą liczbę czynników, takich jak np: złożony stan naprężeń, efekty względnego oddziaływania składników kompozytu, nieliniowość materiału, różne współczynniki rozszerzalności cieplnej włókna i osnowy. Zagadnienia te nie są dotychczas w pełni rozwiązane i są przedmiotem zainteresowań wielu badaczy. Przykłady wyznaczania stanów naprężeń w kompozytowych materiałach włóknistych przedstawiono w [12, 27, 34, 37, 41, 60, 62, 71, 81, 83, 87, 91, 93, 109, 115, 116, 117, 118, 119, 123], i dotyczą one następujących zagadnień:

- analiza współdziałania składników na powierzchni styku włókno-osnowa, w celu określenia racjonalnych warunków współdziałania składników w przenoszeniu obciążeń,
- analiza niszczenia kompozytu rozpatrywana według założeń teorii pękania Griffitha,
- określenie wytrzymałości kompozytu w zależności od właściwości użytych składników i założonym mechanizmie niszczenia struktury materiału.

Prace te dają podstawę sądzić, że jest możliwe uzyskanie rozwiązania zagadnienia projektowania kompozytów pod kątem optymalnej wytrzymałości kompozytu przy zadanych właściwościach użytych składników i ich zawartości objętościowej. W chwili obecnej najczęściej podejmowane problemy mechaniki zniszczenia kompozytu dotyczą na ogół kompozytów zbrojonych jednokierunkowo przy jednoosiowych obciążeniach. Uzyskane rozwiązania nie zawsze pokrywają się z wynikami doświadczeń, świadcząc o złożoności rzeczywistych mechanizmów niszczenia struktury materiału. Jedną z przyczyn niezgodności wyników obliczeń z wynikami eksperymentalnymi można upatrywać w sposobie ułożenia wiązek, poruszanym w niniejszej pracy.

Metody opisu materiałów zbrojonych włóknem ciągłym pod działaniem obciążenia to tzw. teorie wzmocnienia [27, 117, 118]. Określają one właściwości kompozytu, wychodząc z właściwości składników i ich wzajemnego oddziaływania w materiale poprzez odpowiednie modelowanie zjawisk zachodzących w kompozycie. Zbudowany model wzmocnienia pozwala na uzyskanie rozwiązania spełniającego możliwie wszystkie warunki występujące w materiale rzeczywistym. Proponowane obecnie modele charakteryzują się znacznymi rozbieżnościami rozwiązań. Ocena ich dokładności możliwa jest poprzez weryfikację doświadczalną. W zakresie badań doświadczalnych istnieje niski stopień normalizacji pomiarów właściwości tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem ciągłym. W wielu krajach stosuje się ogólne normy dotyczące np. tworzyw sztucznych lub konstrukcji metalowych. Przydatność ich w zakresie stosowania do tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem ciągłym jest niewystarczająca, a interpretacja uzyskanych wyników częstokroć nieadekwatna do rzeczywistych właściwości materiału.

Z praktycznego punktu widzenia ocena możliwości zastosowania teorii wzmocnienia na obecnym etapie do rozwiązania zagadnień rzeczywistych tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem ciągłym bez rozbudowanych badań wstępnych (w celu określenia współczynników oraz sposobu pękania) jest mało przydatna. Jednak elementy kompozytowe wykonywane techniką nawijania należą do grupy materiałów łatwiejszych w obliczeniach, ponieważ każda wiązka rowingu jest układana indywidualnie w ściśle określony sposób. Także użycie metody elementów skończonych (MES), wspomaganej komputerowo, znacznie ułatwia przeprowadzanie obliczeń. Poniżej wyznaczono odkształcenia, naprężenia oraz ciśnienia maksymalne płaszcza nośnego wybranych butli kompozytowych przy użyciu prostej metody inżynierskiej, MES oraz metody analitycznej. Zbiorcze zestawienie wyników zawarto w tabeli 1.3, strona 11.

1.1 Obliczenia wytrzymałościowe butli według założeń makroskopowych

W elementach kompozytowych na bazie włókna ciągłego i lepiszcza, w których włókno jest wykorzystane w sposób optymalny, kierunek ułożenia wiązek rowingu jest zgodny z kierunkiem działania naprężeń głównych. Natomiast osnowa wiąże włókna, to znaczy przenosi przede wszystkim siły poprzeczne i wynikające z nich naprężenia tnące. Poniżej, bazując na powyższym założeniu, wyznaczono w sposób inżynierski ciśnienia niszczące dla jednej z próbnych butli kompozytowych (butla **2**). Przedstawionym sposobem wyznaczono również wytrzymałość końcową lotniczych butli kompozytowych produkowanych w IEL/OW, których konstrukcja (laminat wielowarstwowy [22]) różni się od butli przedstawianych w rozdziale 4.4 pracy. Rozrzut wytrzymałości w badaniach niszczących trzech sztuk butli lotniczych nie przekraczał 20% [14]. Do celów badawczych wykonano cztery butle próbne z jednym typem *warstwy* pod kątem $\alpha = 54°$. Dokładniej wszystkie butle próbne opisano w rozdziale 4.4.

Charakterystyka wyrobu

Butla służy do przechowywania sprężonego gazu. Składa się ze szczelnego, cienkościennego zbiornika stalowego, na który nawinięto płaszcz z laminatu ES. W opracowaniach [14, 78] zawarto niezbędne dane dotyczące komponentów ES oraz metody badań.

tex $[\frac{g}{km}]$	liczba pasm w wiązce	liczba na-wrotów	liczba *warstw*	liczba pasm na skok	kąt nawijania [°]	skok nawijania $[mm]$
2400	60	58	17	J=59160	α=54°	s=267.5

Tablica 1.1: Zestawienie danych dotyczących nawijania butli **2** i danych włókna szklanego.

Dane i założenia przyjęte do obliczeń

l_b = 920 mm – długość butli,
D = 129.4mm – średnica butli,
d = 117.2mm – średnica zbiornika wewnętrznego,
R = 64.7mm – promień obrysu zewnętrznego dennic butli,
r = 58.6mm – promień dennic zbiornika wewnętrznego,
ρ_E = 2,46$\frac{g}{cm^3}$ – gęstość włókna szklanego typu E,
σ_{max} = 1600MPa – naprężenia zrywające dla jednokierunkowego kompozytu ES wyznaczone w [14].

Przyjęto, iż wzmocnienie pasmami rowingu jest zrównoważone gdy udział procentowy włókien rozłożonych w kieruneku obwodowym jest dwa razy większy od włókien rozłożonych w kierunku wzdłużnym [65, 72]. Według tego założenia optymalne wykorzystanie włókien uzyska się przy kącie $\alpha = 54°$.

Założenia

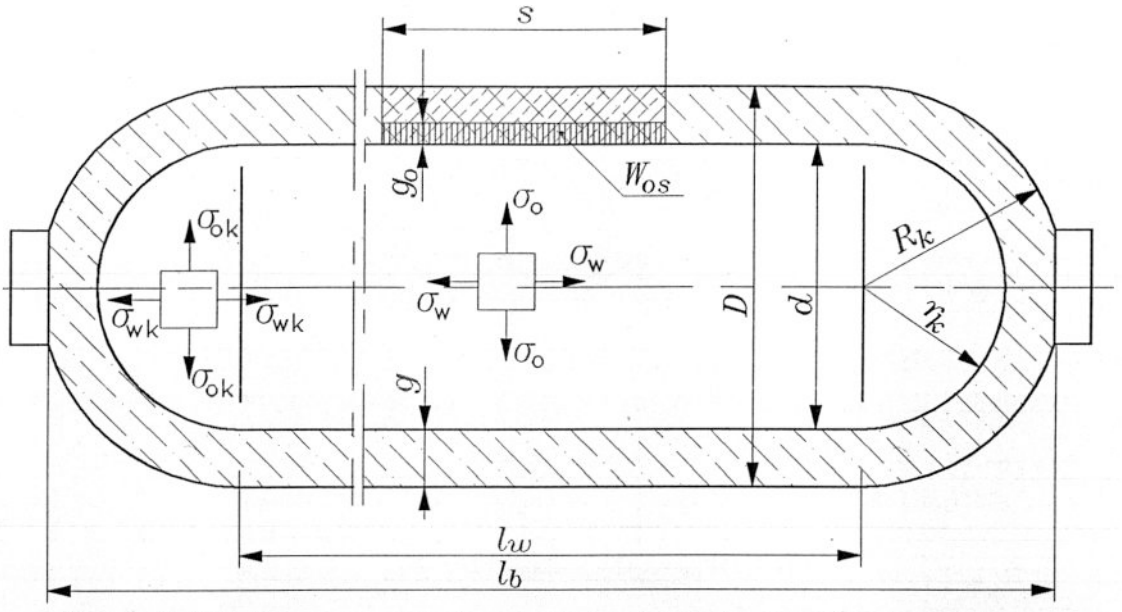
a) włókno szklane rozmieszczone jest równomiernie na całej powierzchni płaszcza nośnego,
b) w obliczeniach pomija się wytrzymałość zbiornika wewnętrznego,
c) do nawijania kolejnych *warstw* butli **2** użyto rowingu 60 pasmowego *tex* 2400, w którym pojedyncze pasmo zawiera 204 włókienka elementarne,
d) w obliczeniach pominięto wpływ osnowy i wiązań międzyfazowych na wytrzymałość kompozytu,
f) przyjęto jednakowe kąty ułożenia *warstw* w części walcowej i dennicach,
g) potraktowano butlę jako zbiornik cienkościenny (dwuosiowe rozciąganie).

Określenie ciśnień

Poniżej wyznaczono maksymalne ciśnienia dla butli **2**, którą wykonano metodą nawijania włókna pod kątem $\alpha = 54°$. Wyznaczono ciśnienia maksymalne dla następujących naprężeń (rys. 1.1):

a) obwodowych σ_o części walcowej,
b) wzdłużnych σ_w części walcowej.

Nie przedstawiono wyznaczania naprężeń w części kulistej butli (σ_{ok} i σ_{wk}), ponieważ na podstawie analizy naprężeń i badań własnych nawijanych butli kompozytowych [14] dennice uznano za przewymiarowaną i nie wymagającą analizy. Przewymiarowanie powstało w wyniku nawinięcia dłuższych pasm w końcowej części butli.



Rysunek 1.1: Schemat rozkładu naprężeń w butli oraz wymiary gabarytowe.

a) Maksymalne ciśnienie P_{omax} w kierunku obwodowym części walcowej

Z podstawowych równań opisujących stan naprężenia nawijanych elementów ciśnieniowych (podanych w punkcie 2.2.1, strona 19 pracy oraz w pracach [65, 72, 73]):

$$\begin{cases} \sigma_o = \sigma_f \cdot \sin^2 \alpha \\ \sigma_w = \sigma_f \cdot \cos^2 \alpha, \end{cases} \tag{1.1}$$

analogicznie zapisano:

$$\begin{cases} J_o = J \cdot \sin^2 \alpha \\ J_w = J \cdot \cos^2 \alpha. \end{cases} \tag{1.2}$$

Liczba pasm J_o przenoszących naprężenia obwodowe w części walcowej na długości skoku s obliczono następująco:

$$J_o = J \cdot \sin^2 \alpha = 59160 \cdot \sin^2 54^\circ = 38721 \frac{\text{pasm}}{s}. \tag{1.3}$$

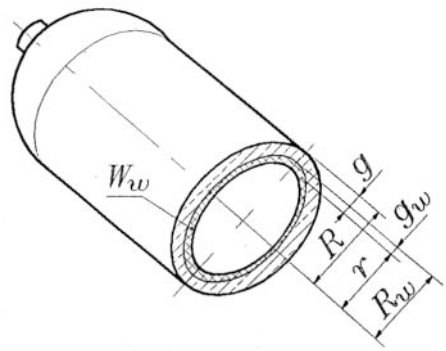
Powierzchnię przekroju W_{pas} jednego pasma włókien szklanych (zawierającego 204 włókienka elementarne o średnicy $d_w = 0.01mm$) wyznaczono następująco:

$$W_{pas} = \pi \cdot (\frac{d_w}{2})^2 \cdot 204 = 0.016mm^2. \tag{1.4}$$

Powierzchnię przekroju W_{pas} można wyznaczyć również w inny sposób:

$$W_{pas} = \frac{tex}{\rho_E \cdot 60pasm} = \frac{2.4\frac{g}{m}}{2.46\frac{g}{m^3} \cdot 60} = 0.016mm^2. \tag{1.5}$$

Powierzchnię przekroju W_{os} części walcowej na długości s (rys. 1.1) obliczono następująco:



Rysunek 1.2: Szkic przekroju poprzecznego butli z zaznaczoną powierzchnią W_w.

$$W_{os} = W_{pas} \cdot J_o \cdot (1 + f_w), \tag{1.6}$$

f_w — współczynnik udziału syciwa w obwodowych laminatach ES wykonywanych techniką nawijania f_w=0.29 [14].

$$W_{os} = 0.016mm^2 \cdot 38721\frac{\text{pasm}}{s} \cdot (1 + 0.29) = 800mm^2. \tag{1.7}$$

Grubość warstwy g_o przenoszącej naprężenia obwodowe w części walcowej na długości skoku s, obliczono następująco:

$$g_o = \frac{W_{os}}{s} = \frac{800mm^2}{267.5} = 3.0mm. \tag{1.8}$$

Maksymalne naprężenie laminatu w kierunku obwodowym będzie równe [80]:

$$\sigma_o = \frac{P_{omax} \cdot D}{2g} \tag{1.9}$$

lub inaczej:

$$P_{omax} = \frac{\sigma_o \cdot 2g_o}{D} = \frac{1600MPa \cdot 2 \cdot 3.0mm}{129.4mm} = 74MPa. \tag{1.10}$$

b) Maksymalne ciśnienie P_{wmax} w kierunku wzdłużnym części walcowej

Z układu równań (3.2) wyznaczono liczbę pasm J_w w przekroju poprzecznym, przenoszących naprężenia wzdłużne σ_o w części walcowej:

$$J_w = J \cdot \cos^2 \alpha = 59160 \cdot \cos^2 54^\circ = 20439\text{pasm}. \tag{1.11}$$

Osiową powierzchnię przekroju laminatu — W_w części walcowej (rys. 1.2), przenoszącą wyłącznie naprężenia wzdłużne obliczono następująco:

$$W_w = J_w \cdot W_{pas} \cdot (1 + f_w) = 20439\text{pasm} \cdot 0.016mm^2 \cdot 1.29 = 422mm^2. \tag{1.12}$$

Grubość warstwy g_w przenoszącej naprężenia wzdłużne obliczono następująco:

$$W_w = \pi(R_w^2 - r^2) = \pi((g_w + r)^2 - r^2), \tag{1.13}$$

$$g_w = \sqrt[2]{\frac{W_w}{\pi} + r^2} - r = 1.14mm. \tag{1.14}$$

Największe naprężenie jakie zdoła przenieść włókno wzdłużne obliczono z zależności:

$$\sigma_w = \frac{P_{wmax} \cdot D}{4g}. \tag{1.15}$$

Po przekształceniu i podstawieniu wartości liczbowych:

$$P_{wmax} = \frac{\sigma_w \cdot 4g_w}{D} = \frac{1600MPa \cdot 4 \cdot 1.14mm}{129.4mm} = 56MPa. \tag{1.16}$$

Zestawienie wyników

a) $P_{omax} = 74MPa$,
b) $P_{wmax} = 56MPa$.

Dyskusja wyniku

Za maksymalne ciśnienie jakie może wytrzymać butla przyjęto $P_{wmax} = 56MPa$, ponieważ jest to mniejsze ciśnienie z wyżej wymienionych. Rozbieżność powyższych wyliczeń wynika z niedokładności metody opartej na szeregu przybliżonych założeń. Wyniki obliczeń należy traktować szacunkowo i jako wstępne określenie ciśnień niszczących. Przedstawiona metoda wyznaczania ciśnień, poprzedzona prostymi badaniami na oprzyrządowaniu NOL, okazała się dość dokładna (patrz tabela 1.3, strona 11), a podstawową zaletą jest jej prostota.

W odniesieniu do podstawowych równań nawijanych powłok cylindrycznych, przedstawionych w punkcie 2.2.1, strona 19 pracy oraz w pracach [65, 72, 73], kąt nawijania powinien wynosić $\alpha = 54.5°$. Rzeczywista wartość kąta nawijania zależy między innymi od rodzaju syciwa, połączeń międzyfazowych włókna szklanego i syciwa oraz wpływu stalowego zbiornika wewnętrznego na warunki pracy nawiniętego kompozytu ES, a także wielu innych aspektów.

Konstrukcja butli złożona ze stalowego zbiornika wewnętrznego i oplotu ES nie jest dobrym układem ze względu na nośność. Przy niewielkim ciśnieniu w stali mogą następować odkształcenia plastyczne. Ciśnienie to wyznaczono doświadczalnie i wynosi ono około 17 *MPa* (170 *barów*, patrz praca, punkt 4.4.7 „Wyniki pomiarów odkształcenia butli").

1.2 Obliczenia butli kompozytowej metodą elementów skończonych (MES)

W tym podpunkcie przedstawiono obliczenia MES butli **3** i **4**. Szczegółowy algorytm oraz opis obliczeń przedstawiono w [30, 31]. Ze względu na warstwową budowę płaszcza butli do obliczeń MES zastosowano wielowarstwowy element skończony, któremu przy zachowaniu pewnych warunków można nadać właściwości ortrotropowe w określonych kierunkach

[102]. Dane przyjęte do obliczeń zamieszczono w punkcie 1.1, załącznika strona 5 oraz w pracy, tabela 4.5. Każdą *warstwę* wykonaną metodą nawijania podzielono na dwie podwarstwy. Jedna składa się z włókien leżących pod kątem 54°, druga z włóknami nawiniętymi pod kątem -54° względem podłużnej osi butli. Przy tworzeniu modelu warstwowego należy podać grubość poszczególnych podwarstw kompozytu. W rozważanym przypadku grubości te określono na podstawie pomiarów średnicy butli przed i po nawinięciu materiału kompozytowego. Całkowita grubość płaszcza kompozytowego wynosi g=5.3mm, zatem średnia grubość jednej podwarstwy wynosi:

$$g_w = \frac{g}{K_w} = \frac{5.3}{26} = 0.204[mm] \tag{1.17}$$

g — grubość płaszcza kompozytowego,
g_w — grubość jednej podwarstwy,
K_w — liczba podwarstw w obliczeniach MES.

Podczas tworzenia modelu dyskretnego zastosowano warstwowy, czterowęzłowy, powłokowy element skończony. Oś **a** materiałowego układu współrzędnych pokrywa się z kierunkiem nawijania wiązek rowingu szklanego. W modelu dyskretnym pominięto konstrukcję płaszcza stalowego, zaś dla poszczególnych podwarstw przyjęto: w kierunku nawijania włókien właściwości jednokierunkowego kompozytu ES oraz w kierunku prostopadłym do kierunku nawijania właściwości osnowy epoksydowej. Poniżej przedstawiono wielkości charakteryzujące każdą z podwarstw [27]:

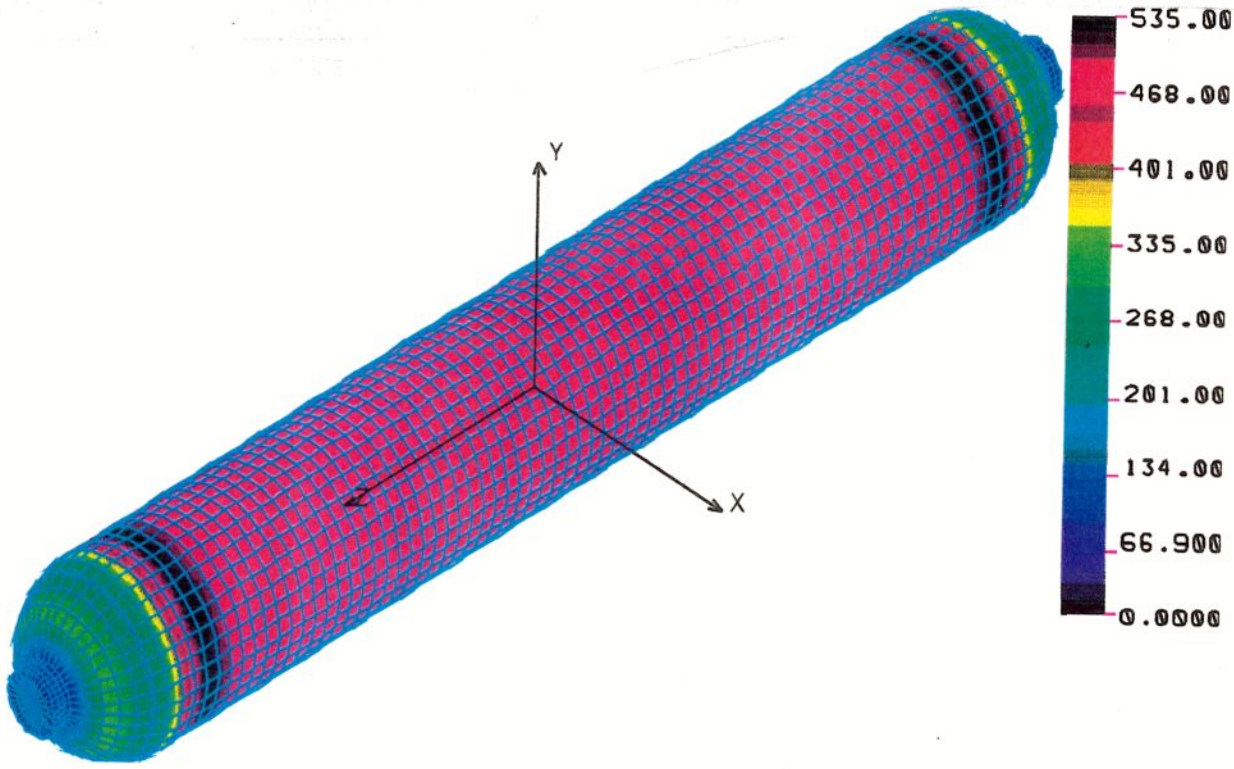
EX – moduł Younga włókna szklanego =70265 [MPa],
EY – moduł Younga żywicy epoksydowaj =6568 [MPa],
NUXY – współczynnik Poissona =0.295 [–],
NUYZ – współczynnik Poissona =0.295 [–],
NUZX – współczynnik Poissona =0.295 [–],
GXY – moduł Kirchoffa =3496 [MPa],
GYZ – moduł Kirchoffa =3410 [MPa],
GXZ – moduł Kirchoffa =3496 [MPa].

W pierwszej fazie obliczeń stworzono model geometryczny składający się z punktów, krzywych i powierzchni. Następnie zdefiniowano wielowarstwowy element skończony SHELL4L, składający się z dwudziestu sześciu podwarstw. Zdefiniowano stałe materiałowe oraz scharakteryzowano poszczególne podwarstwy. Na istniejących powierzchniach wygenerowano elementy skończone. Kompletny model dyskretny składa się z 3097 węzłów i 3096 elementów. Butlę obciążono ciśnieniem wewnętrznym o wartości 42 MPa. Na rys. 1.3 przedstawiono wykres naprężeń na powierzchni butli.

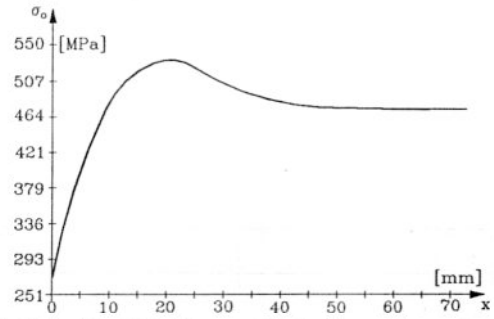
W wyniku obliczeń otrzymano wartości przemieszczeń węzłów elementów skończonych oraz wartości naprężeń zredukowanych σ_{red} w elementach dla każdej z podwarstw i wartości składowej naprężeń σ_x w kierunku materiałowym – również dla każdej z podwarstw. Wyniki otrzymane z obliczeń przedstawiono w tabeli 1.2. Zbliżając się do powierzchni zewnętrznej butli wartości naprężeń osiągają minimum dla podwarstw 18÷24. Z zagadnienia *Lamégo* takie minimum powinno wystąpić w warstwach zewnętrznych. Wykresy rozkładu naprężeń na powierzchni podwarstw butli pokazują koncentrację naprężeń na obu końcach części walcowej. Taki stan potwierdzają równierz badania: EA, tensometryczne i holograficzne oraz położenie końcowych zniszczeń badanych butli (również lotniczych).

nr pod-warstwy	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	23	24	25	26
σ_{red} $[MPa]$	531	535	514	517	500	489	480	471	467	464	462	462	461	465	461	468	469
σ_x $[MPa]$	549	553	524	526	499	473	465	464	464	463	463	473	491	507	510	526	526

Tablica 1.2: Naprężenia występujące w warstwach modelu butli.



Rysunek 1.3: Wykres naprężeń na powierzchni butli.



Rysunek 1.4: Rozkład naprężeń obwodowych wzdłuż butli.

nr butli	σ_{red} z obliczeń MES (punkt 1.2)	σ_{red} z obliczeń analitycznych (punkt 1.3)	σ_{red} wyznaczone z odkształceń	P_{max} z obliczeń inżynierskich (punkt 1.1)	P_{niszcz} ciśnienie niszczące z badań
1	527[MPa]	454.8[MPa]	—	495 [*barów*]	527 [*barów*]
2	466[MPa]	402.8[MPa]	—	560 [*barów*]	590 [*barów*]
3	535[MPa]	463.7[MPa]	363[MPa]	334 [*barów*]	425 [*barów*]
4	535[MPa]	501.4[MPa]	363[MPa]	334 [*barów*]	425 [*barów*]

Tablica 1.3: Naprężenia zredukowane oraz ciśnienia wyznaczone według różnych analiz.

1.3 Analityczne obliczenia wytrzymałościowe butli

Szczegółowy algorytm oraz opis obliczeń analitycznych butli przedstawiono w [31]. W celu wyznaczenia stałych technicznych kompozytu warstwowego posłużono się algorytmem przedstawionym w [27]. Współczynnik wzmocnienia f został wyznaczony doświadczalnie na podstawie pomiaru masy kompozytu i masy zawartego włókna. Do obliczeń przyjęto:

$E_w = 73000$ MPa
$\nu_w = 0.22$
$E_0 = 5350$ MPa
$\nu_0 = 0.38$
$f = 0.53$

Na podstawie zależności podanych w modelu Pucka [91, 92] obliczono stałe techniczne warstwy elementarnej. Naprężenia w płaszczu nośnym wyznaczono w oparciu o zależności przedstawione w [112]. W obliczeniach pominięto wpływ wewnętrznego zbiornika stalowego. Wyniki obliczeń naprężeń obwodowych panujących w butli jako największych przedstawiono w sposób graficzny na rys. 1.4. Największe naprężenia obwodowe występują w odległości $20mm$ od miejsca przejścia części walcowej w dennicę kulistą i wynoszą $\sigma_{omax} = 527.2$ MPa. Największe naprężenia wzdłużne $\sigma_{wmax} = 344.6$ MPa.

Rozdział 2

Zestaw tablic z widokami nawojów

2.1 Wprowadzenie

W procesie projektowania i wykonywania metodą nawijania, np. rur, butli i innych elementów kompozytowych napotyka się na wiele problemów, głównie związanych ze strukturą. W dostępnej literaturze dotyczącej konstruowania, projektowania oraz technologii wykonania struktur kompozytowych elementów nawijanych (teorie wzmocnienia [27, 37, 81, 117], opisy geometrii nawijania [72, 76, 89, 97]) nie jest poruszany problem różnorodności nawojów. Różnorodność zastosowanych nawojów może być przyczyną rozbieżności wyników badań dotychczas wykonywanych przez wielu badaczy. Wyniki badań autora przedstawione w rozdziale 4 pracy wydają się potwierdzać słuszność powyższego przypuszczenia.

W rozdziale 2 pracy opisano szczegółowo metodę tablicową oraz zasady korzystania z przedstawionych w załączniku tablic i widoków nawojów.

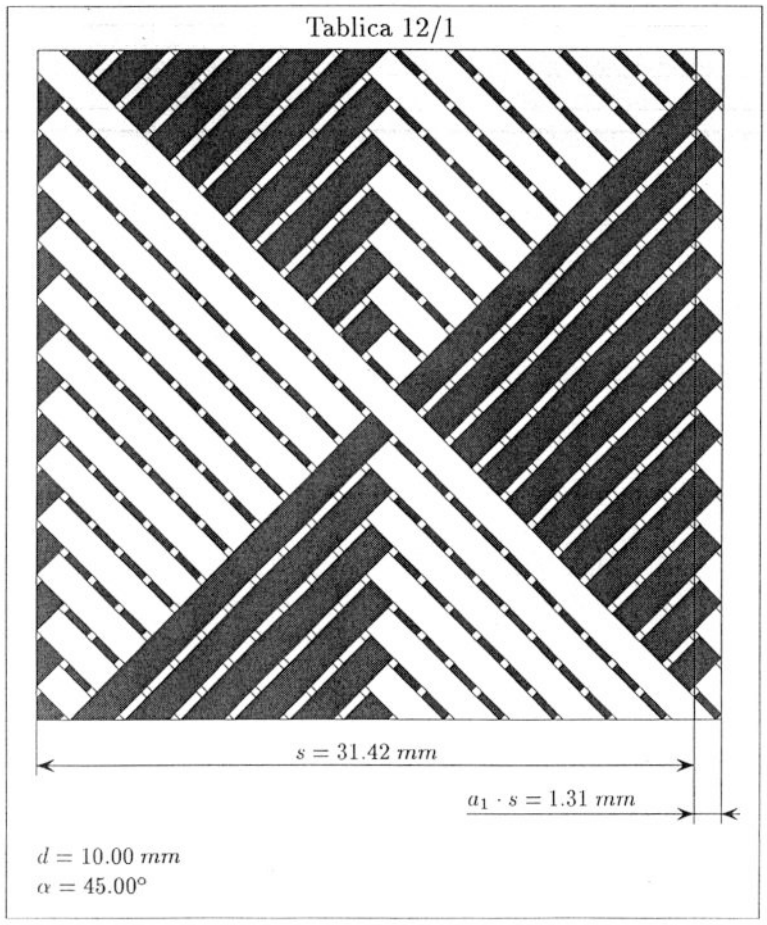
W metodzie tablicowej dowolny nawój opisują jedynie dwie liczby np. 11/4 (wielkość tablicy / numer wiersza). Projektujący element nawijany korzysta z tablicy, w której wybiera nawój oraz opisujące go wielkości, takie jak współczynnik reszty skoku nawijania a i numer nawoju N_r.

Przedstawiony poniżej zestaw tablic z widokami nawojów nie odnosi się tylko do elementów walcowych, ale również do innych brył. W następnym podrozdziale przedstawiono przykłady wykorzystania nawojów przy nawijaniu takich brył jak kula, stożek i torus. Zamieszczone tablice z widokami nawojów można również przenieść na bryły złożone z wyżej wymienionych, np. tak jak to przedstawiono na rys. 2.1 strona 18 pracy, a także inne bryły nieobrotowe, jak prostopadłościany, graniastosłupy i inne.

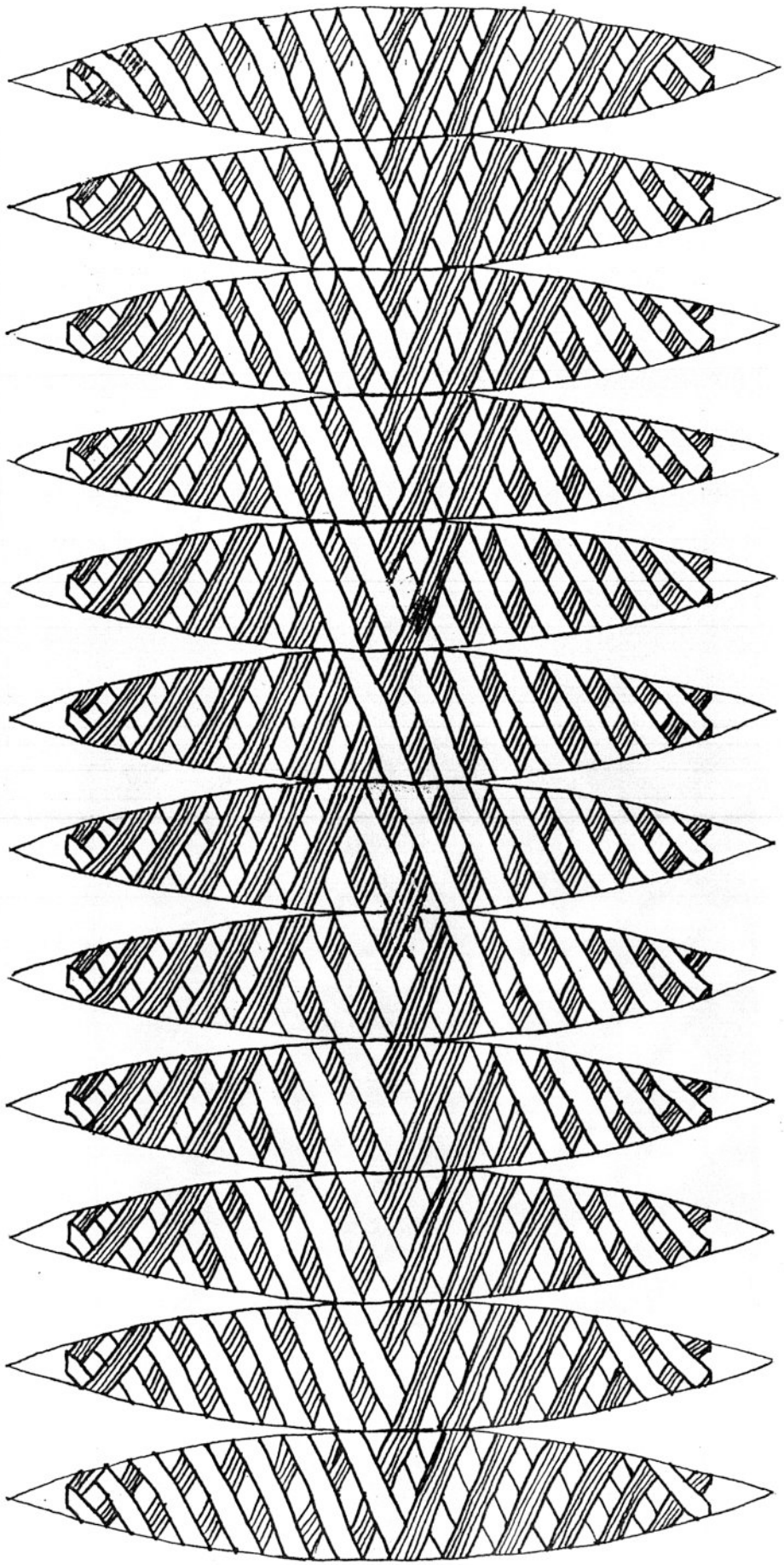
2.2 Wybrane przykłady nawijania brył regularnych

2.2.1 Nawijanie kuli

Na rys. 2.1 przedstawiono widok nawoju 12/1 dla walca, który wybrano z zestawu zamieszczonego w następnym podrozdziale. Nawój ten wykonano na kuli i uwidoczniono na rozwinięciu rys. 2.2. Oś nawijania kuli leży poziomo, podobnie jak na rys. 2.1.



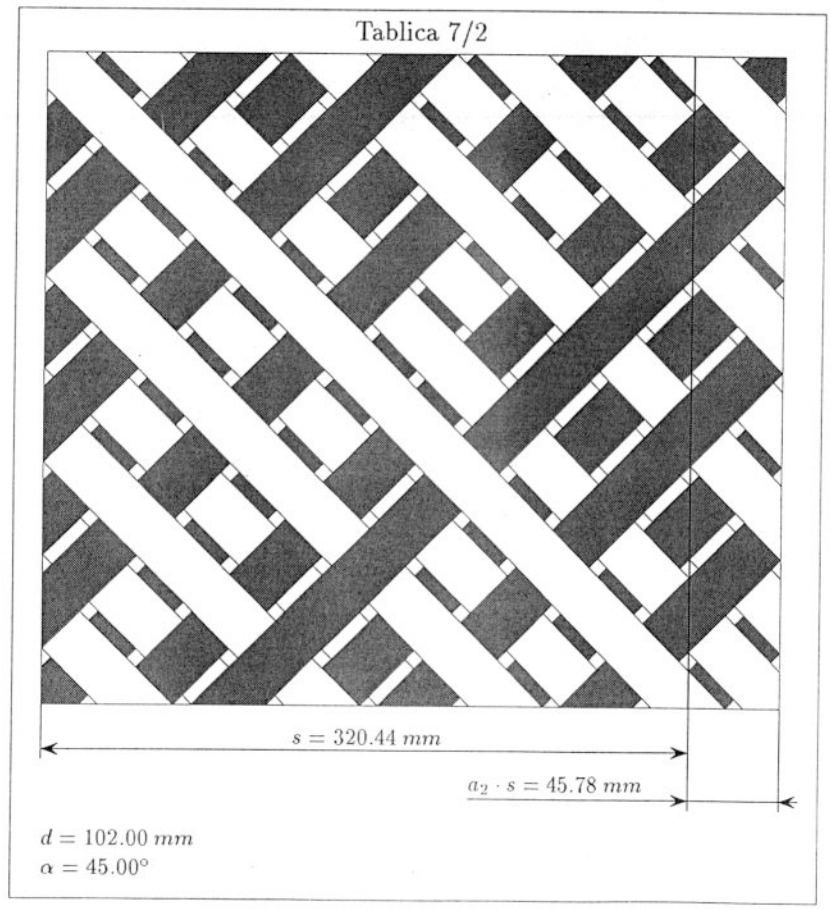
Rysunek 2.1: Widoki nawoju 12/1.



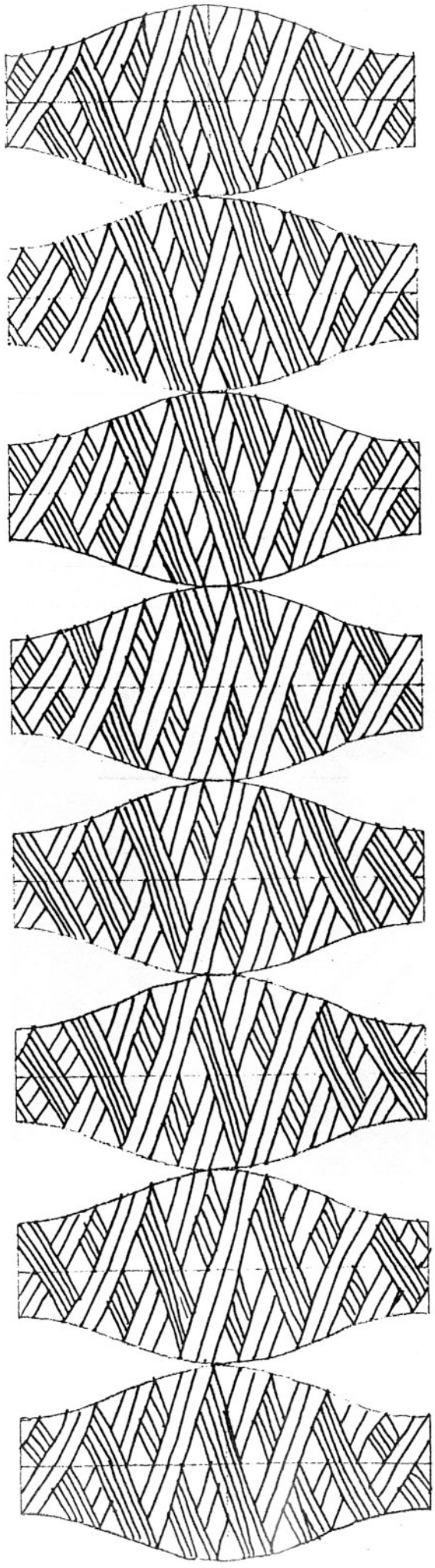
Rysunek 2.2: Rozwinięcie kuli z nawojem 12/1.

2.2.2 Nawijanie torusa

Na rys. 2.3 przedstawiono widok nawoju 7/2 dla walca, który wybrano z zestawu zamieszczonego w następnym podrozdziale. Nawój ten wykonano na torusie i uwidoczniono na rozwinięciu rys. 2.4. Jednak torus ten nie jest pierścieniem zamkniętym. Oznacza to, iż w ten sposób można nawijać spiralę. Przy nawijaniu torusa zamkniętego można wykonać nawój z dwoma przejściami, lecz bez przeplotów (porównaj rys. 2.2 strona 20 pracy). Oś nawijania torusa z rys. 2.4 wyznacza środek okręgu tworzącego, czyli leży ona w płaszczyźnie pionowej przedstawionego rozwinięcia.



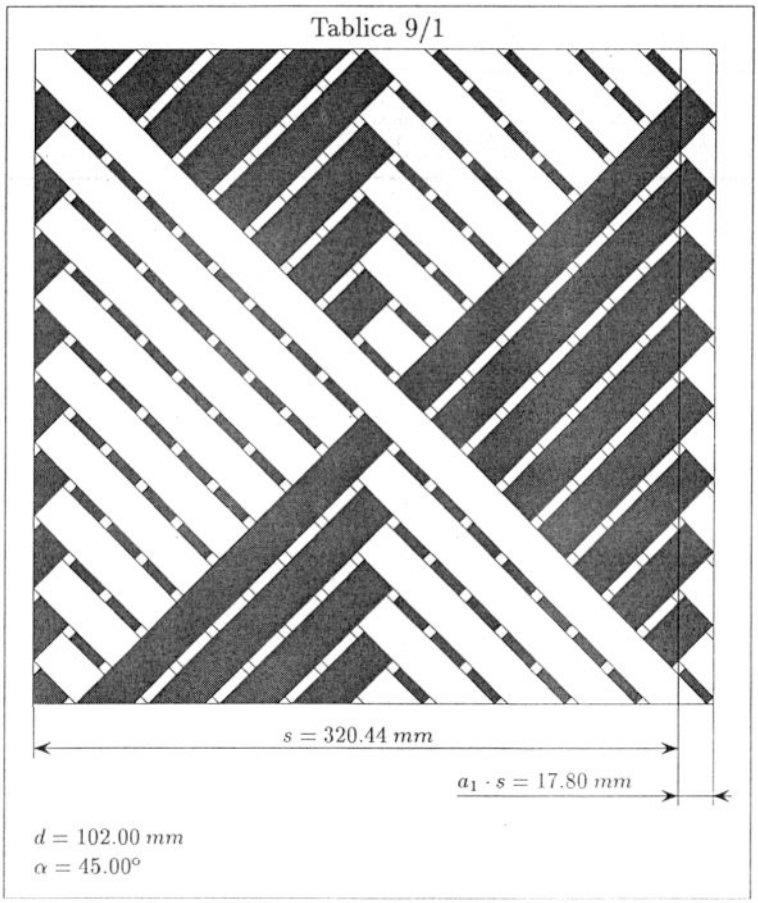
Rysunek 2.3: Widoki nawoju 7/2.



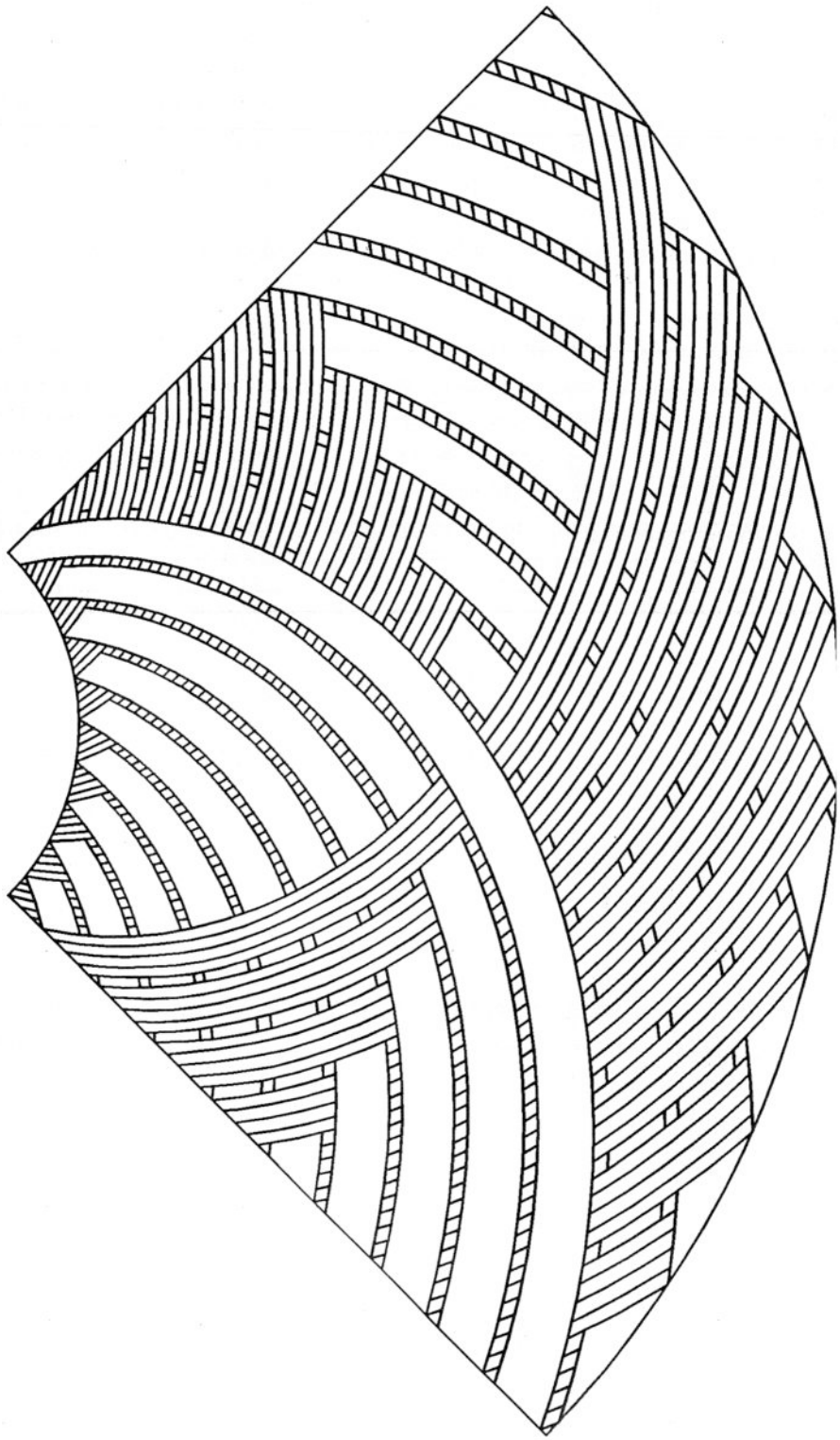
Rysunek 2.4: Rozwinięcie torusa z nawojem 7/2.

2.2.3 Nawijanie stożka

Na rys. 2.5 przedstawiono widok nawoju 9/1 dla walca, który wybrano z zestawu zamieszczonego w następnym podrozdziale. Nawój ten wykonano na stożku i uwidoczniono na rozwinięciu rys. 2.6. Oś nawijania stożka leży poziomo, podobnie jak na rys. 2.5.



Rysunek 2.5: Widoki nawojów 9/1.



Rysunek 2.6: Rozwinięcie stożka z nawojem 9/1.

2.3 Opis danych wejściowych

W poniższym spisie zawarto tablice o numerach od 2 do 53 oraz widoki wszystkich opisywanych przez tablice nawojów. Zestawienie tablic nawojów przedstawiono na rys. 2.7. Oś pozioma jest skokiem nawijania z podziałem na reszty skoku nawijania a. Oś pionowa przedstawia kolejne tablice nawojów uszeregowane od 1 do 53. Punkty wyznaczone przez obróconą literę „L" (⅂) są nawojami. Rzut punktu na oś pionową wskazuje numer tablicy, natomiast rzut na oś poziomą wskazuje współczynnik reszty skoku nawijania a. Numer tablicy oraz współczynnik reszty skoku nawijania w pełni określają nawój.

Okręgami zaznaczono nawoje o najlepszej strukturze ze względu na wytrzymałość (patrz rozdział 5 „Wnioski i uwagi końcowe" strona 102 pracy).

Wszystkie możliwe przypadki nawojów (zgrupowane w kolejnych tablicach) przedstawiono poniżej dla stałego skoku nawijania i stałego kąta nawijania. W kolumnach tablic występują:

- kolejny numer nawoju N_r,
- obwód rdzenia πd , zapisany w postaci liczb będących kolejnymi numerami wiązek nawijanych na rdzeń – przy wstawianiu kolejnych numerów wiązek można posłużyć się zasadą: „na przekątnej jedynka", a następnie wpisać kolejne liczby w odstępach takich jakie powstały między zerem i jedynką,
- współczynnik reszty skoku nawijania a wyznaczono z następującej zależności:

$$a = \frac{N_r}{Z}, \tag{2.1}$$

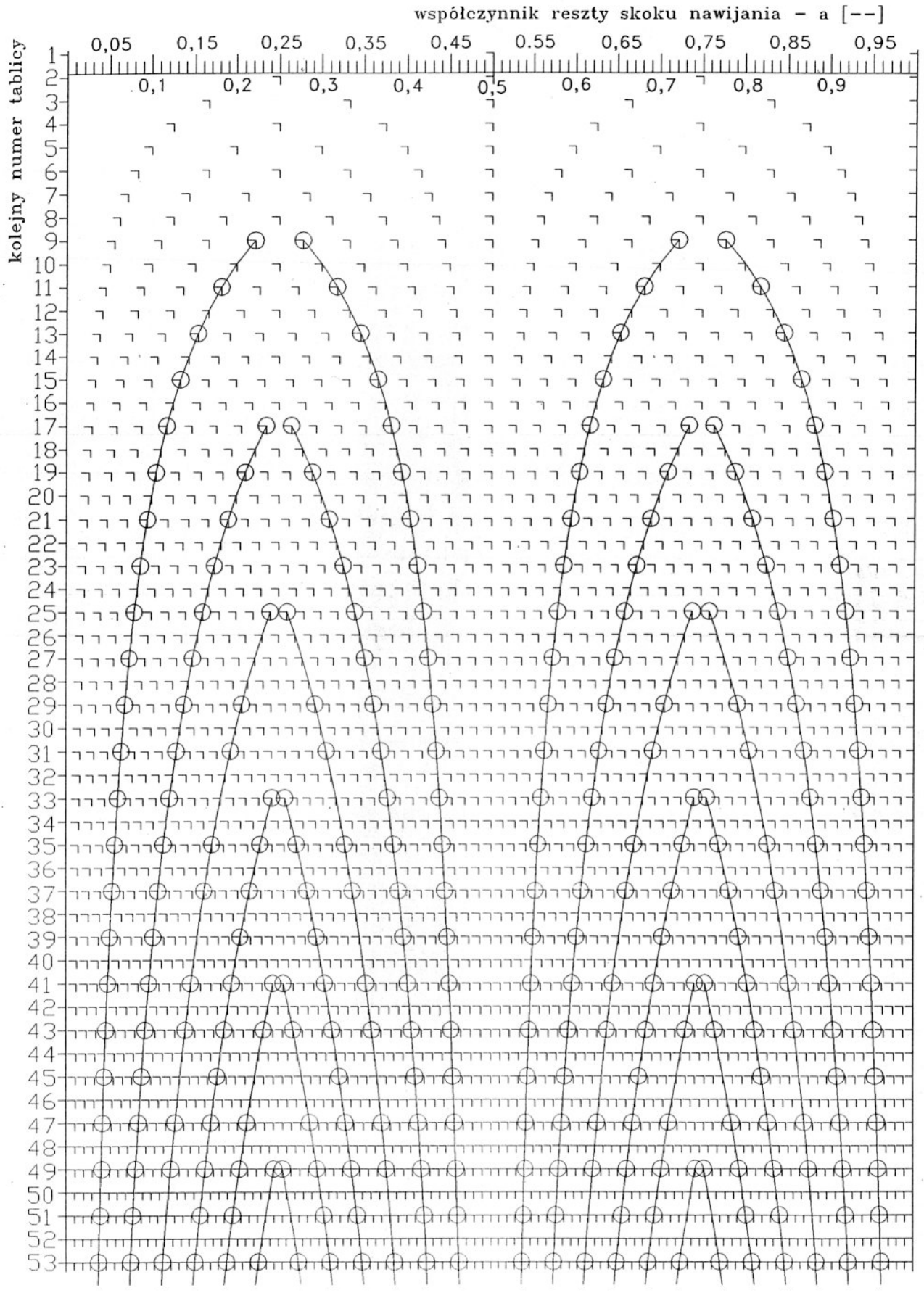
gdzie: Z — liczba przejść lub liczba nawrotów suportu (nawroty z prawej i lewej strony nawijarki).

Ze względu na współczynnik reszty skoku nawijania a rozróżnia się w tablicy cztery przedziały podobieństwa nawojów:

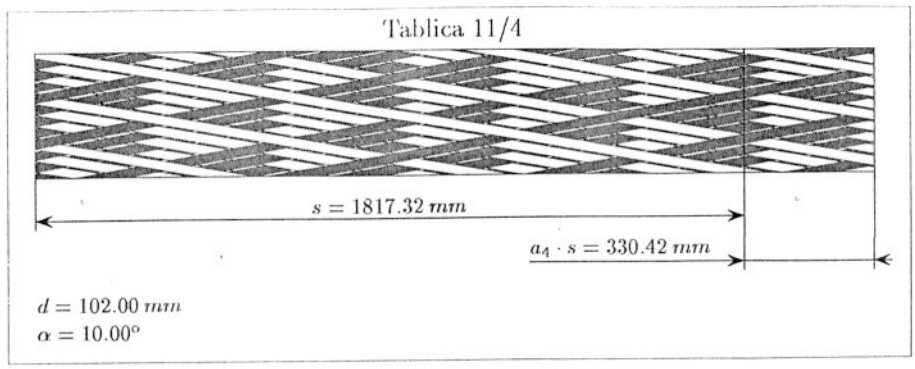
1) $a \in (0\ ,\ 0.25)$
2) $a \in (0.25\ ,\ 0.5)$
3) $a \in (0.5\ ,\ 0.75)$
4) $a \in (0.75\ ,\ 1)$

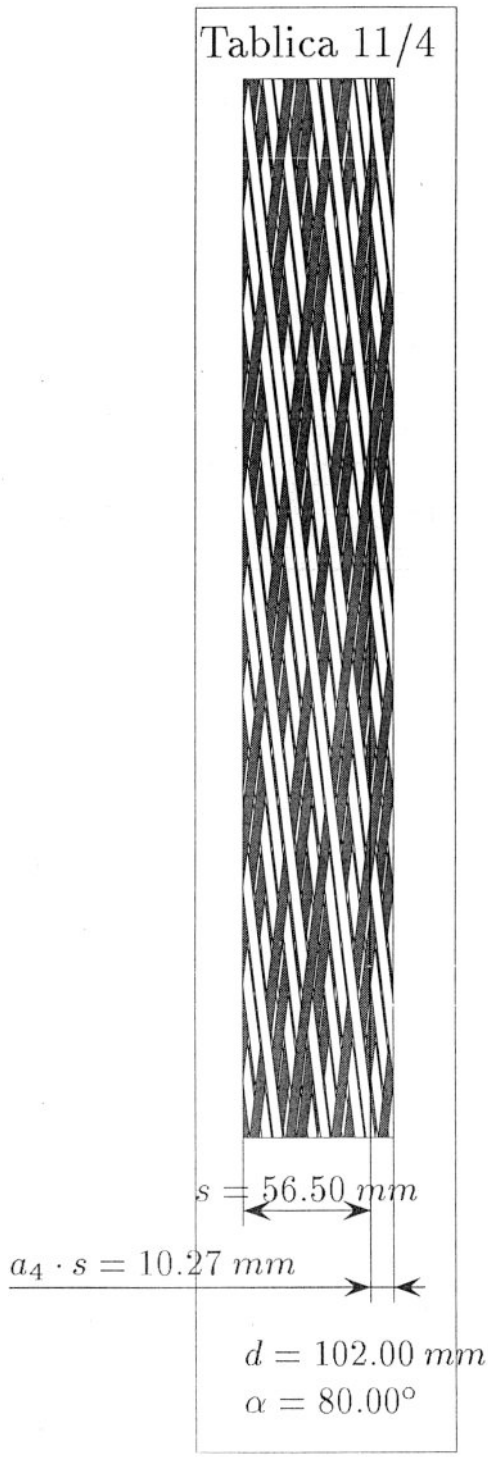
Podział na przedziały jest widoczny w kolumnie obwodu rdzenia πd. Nawój N_r1 jest w efekcie końcowym taki sam jak nawój ostatni i nawoje środkowe, o czym świadczy kolejność liczb w wierszu (w pracy na rys. 2.5 strona 23 i rys. 4.27 strona 82, przedstawiono pełne przykłady tablic nawojów uwidaczniające powyższe stwierdzenia). Różnica jedynie jest taka, że nawoje te parami mają zwrot kierunku narastania kolejnych numerów wiązek na obwodzie przeciwny do kierunku obracania się rdzenia. Analogiczne podobieństwa odnoszą się do następnych grup nawojów. Powyższe podobieństwa nawojów pozwalają na uproszczenie tablicy, to znaczy zapisania tylko wierszy spełniających warunek $a \in (0, 0.25)$, co zaznaczono pogrubionym drukiem na rys. 2.5 i ramką na rys.42.7. Tablice zebrane w załączniku są tablicami po uproszczeniu.

Widok nawoju zawiera w górnej części numer tablicy, wartość skoku nawijania s, wartość reszty skoku nawijania as, a także średnicę rdzenia d i wartość kąta nawijania α. Na rys. 2.8 przedstawiono dwa skrajne przypadki tych samych nawojów jednak różniących się wartością kąta nawijania α.



Rysunek 2.7: Zestawienie tablic nawojów.



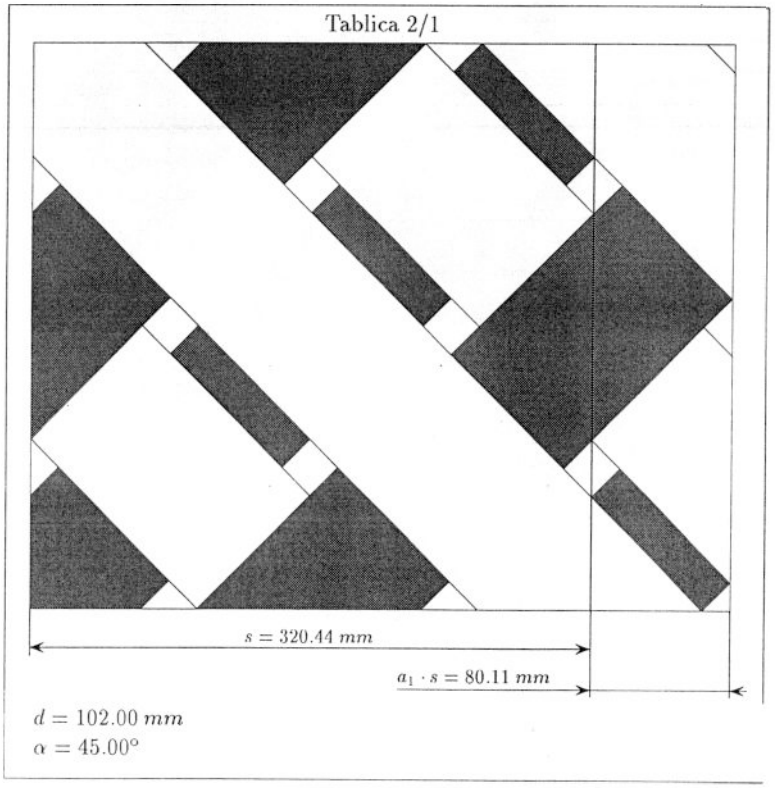


Rysunek 2.8: Dwa skrajne przypadki tych samych nawojów jednak różniących się wartością kąta nawijania α.

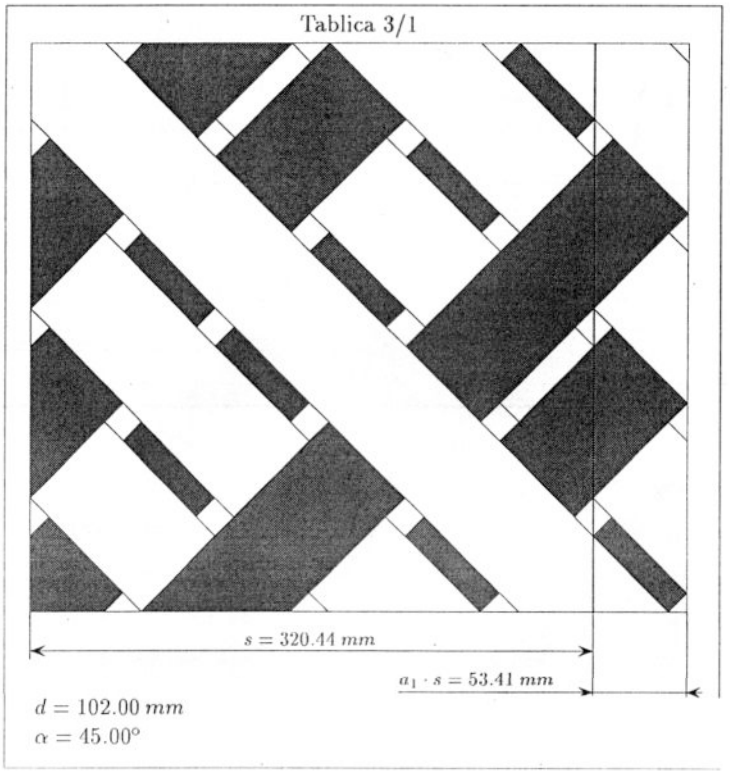
2.4 Pełny zestaw tablic z widokami nawojów dla liczby wiązek na obwodzie rdzenia od 2 do 53

Liczba wiązek rowingu: 2			
N_r	$\|\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow\|$		$a_{Nr} = N_r/(2 \cdot 2)$
1	1	2	1/4

Tablica 2/1

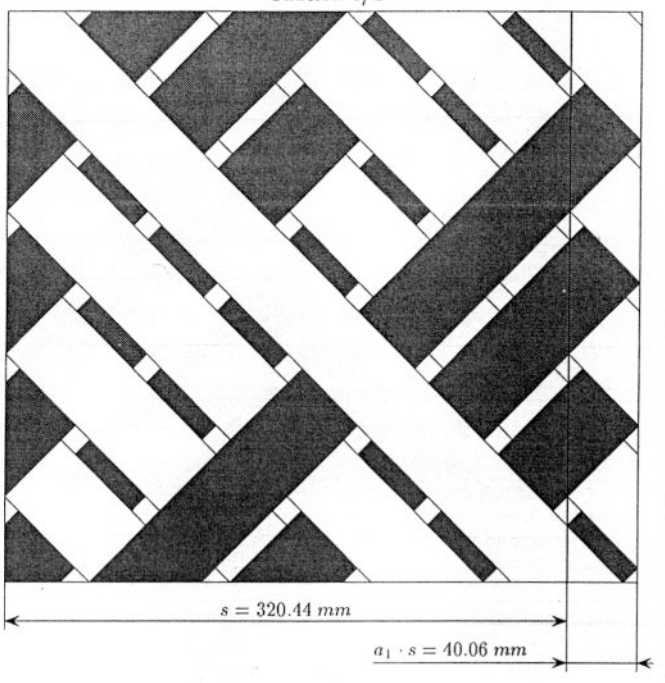


Liczba wiązek rowingu: 3				
N_r	$\|\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow\|$			$a_{Nr} = N_r/(2 \cdot 3)$
1	1	2	3	1/6



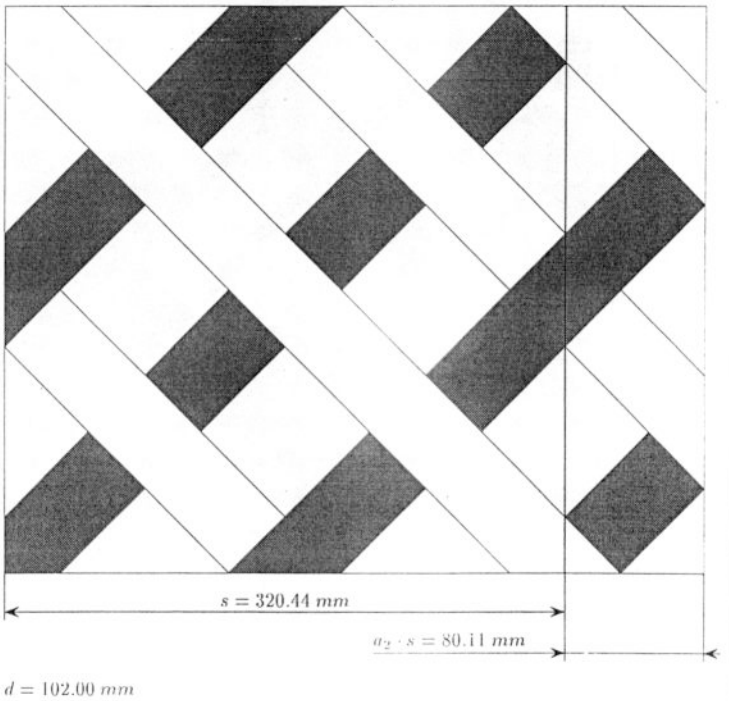
Liczba wiązek rowingu: 4					
N_r	$\|\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow\|$				$a_{Nr} = N_r/(2 \cdot 4)$
1	1	2	3	4	1/8
2	0	1	0	2	2/8

Tablica 4/1



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

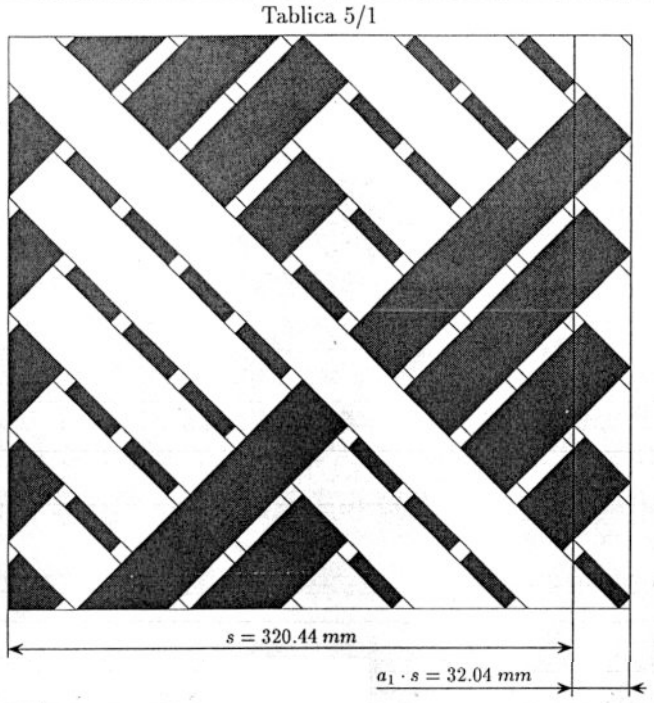
Tablica 4/2



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

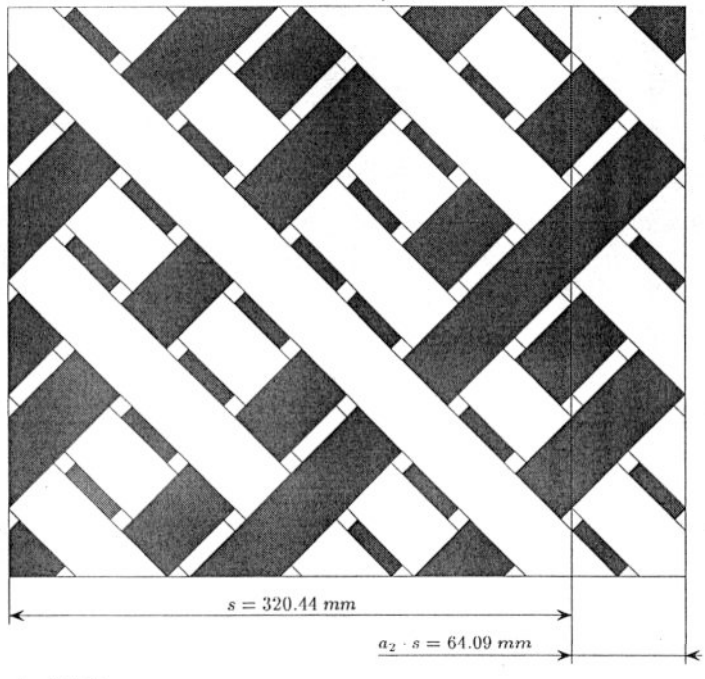
Liczba wiązek rowingu: 5						
N_r	$\|\longleftarrow \pi \cdot d \longrightarrow\|$					$a_{Nr} = N_r/(2 \cdot 5)$
1	1	2	3	4	5	1/10
2	3	1	4	2	5	2/10

Tablica 5/1



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

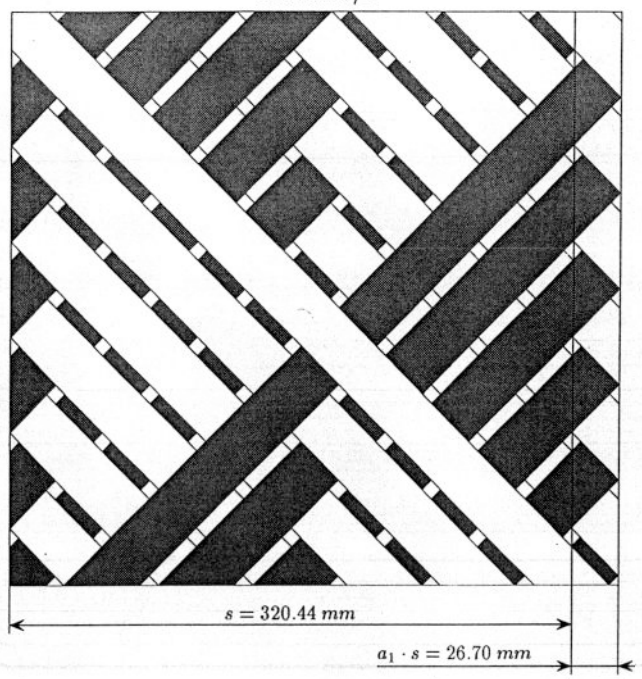
Tablica 5/2



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

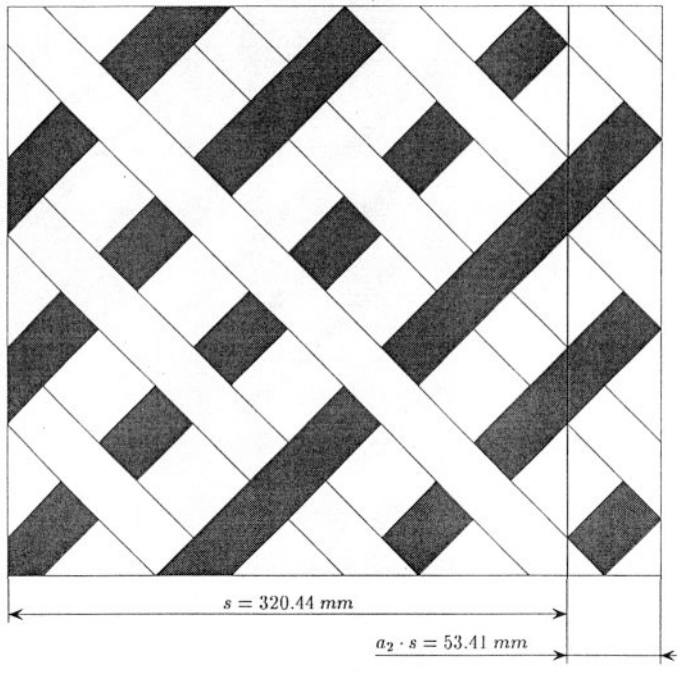
Liczba wiązek rowingu: 6							
N_r	$\lvert\longleftarrow \quad \pi \cdot d \quad \longrightarrow\rvert$						$a_{Nr} = N_r/(2 \cdot 5)$
1	1	2	3	4	5	6	1/12
2	0	1	0	2	0	3	2/12
3	0	0	1	0	0	2	3/12

Tablica 6/1



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

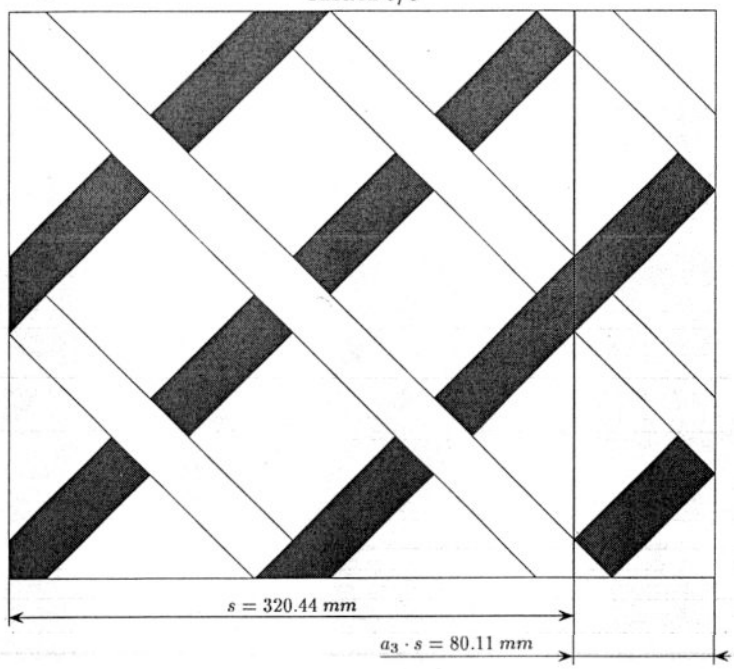
Tablica 6/2



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

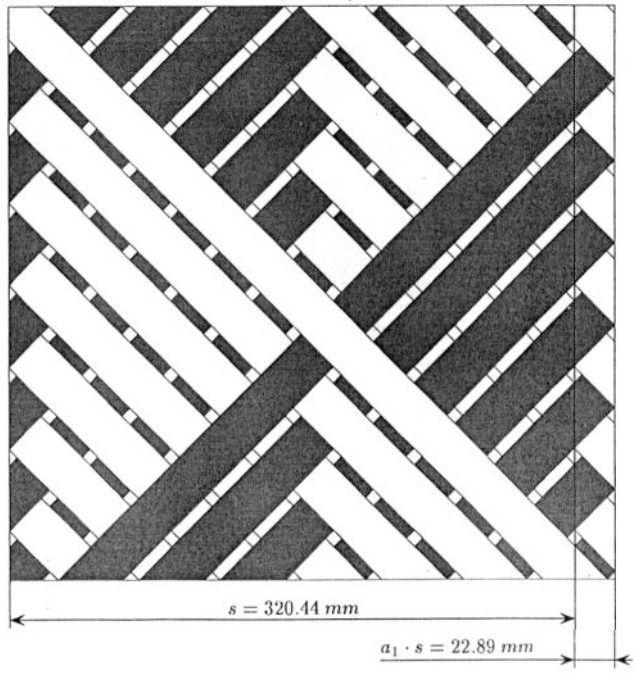
Liczba wiązek rowingu: 7								
N_r	$\|\longleftarrow \quad \pi \cdot d \quad \longrightarrow\|$							$a_{Nr} = N_r/(2 \cdot 7)$
1	1	2	3	4	5	6	7	1/14
2	4	1	5	2	6	3	7	2/14
3	5	3	1	6	4	2	7	3/14

Tablica 6/3



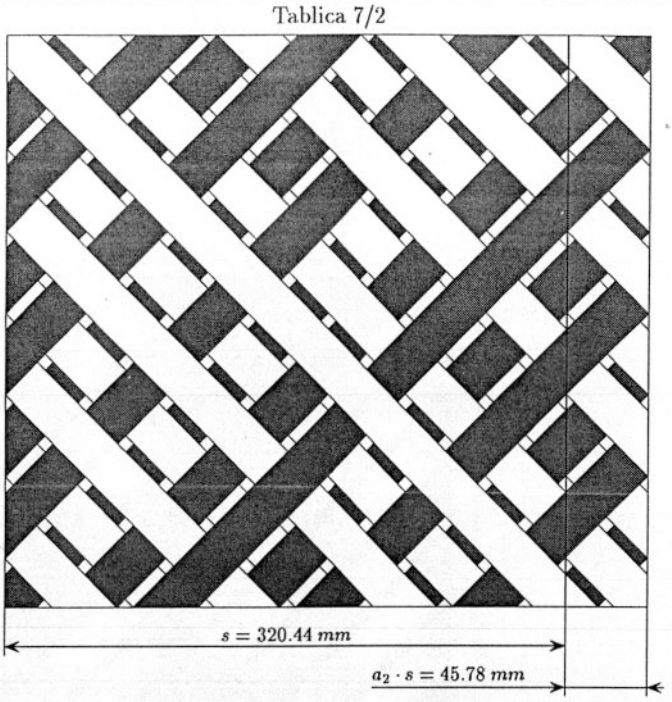
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 7/1



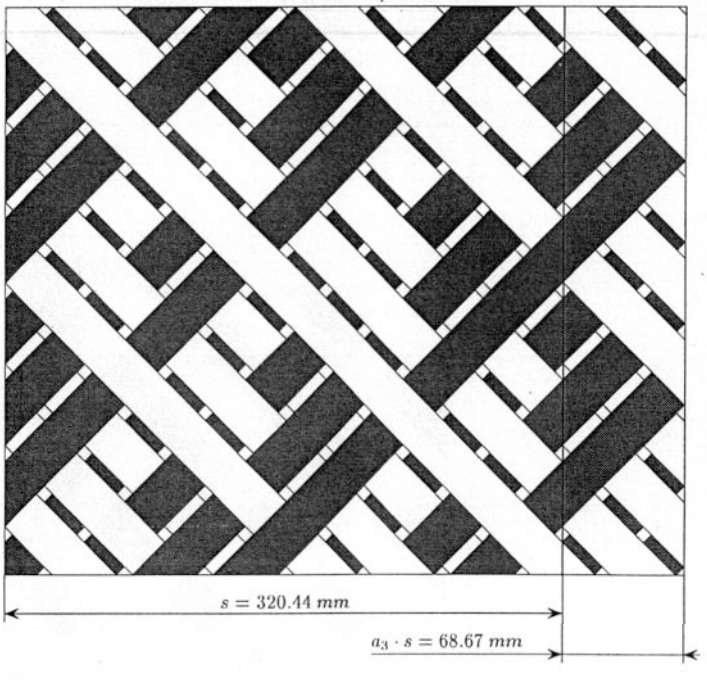
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 7/2



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

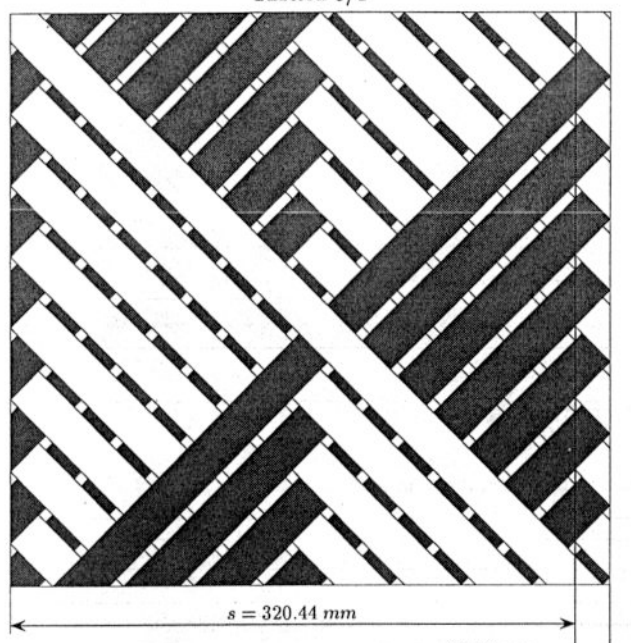
Tablica 7/3



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

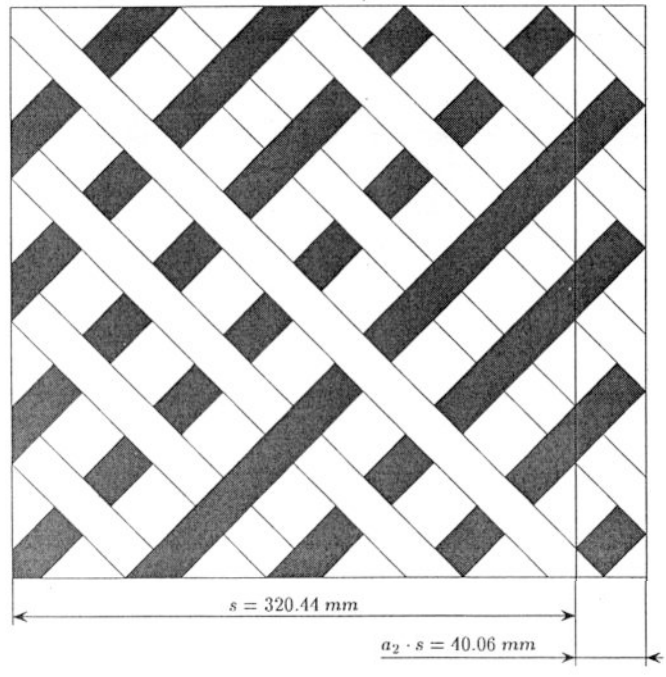
Liczba wiązek rowingu: 8									
N_r	$\|\longleftarrow \quad \pi \cdot d \quad \longrightarrow\|$								$a_{Nr} = N_r/(2 \cdot 8)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	1/16
2	0	1	0	2	0	3	0	4	2/16
3	3	6	1	4	7	2	5	8	3/16
4	0	0	0	1	0	0	0	2	4/16

Tablica 8/1



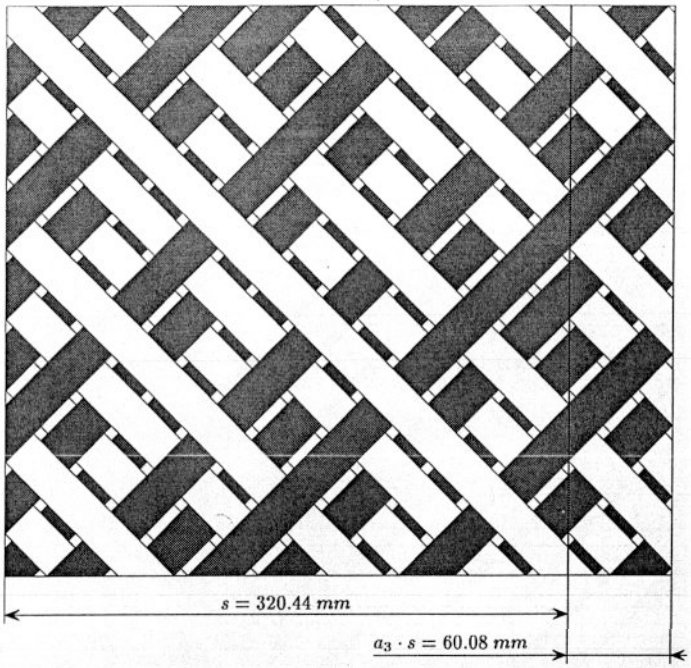
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 8/2



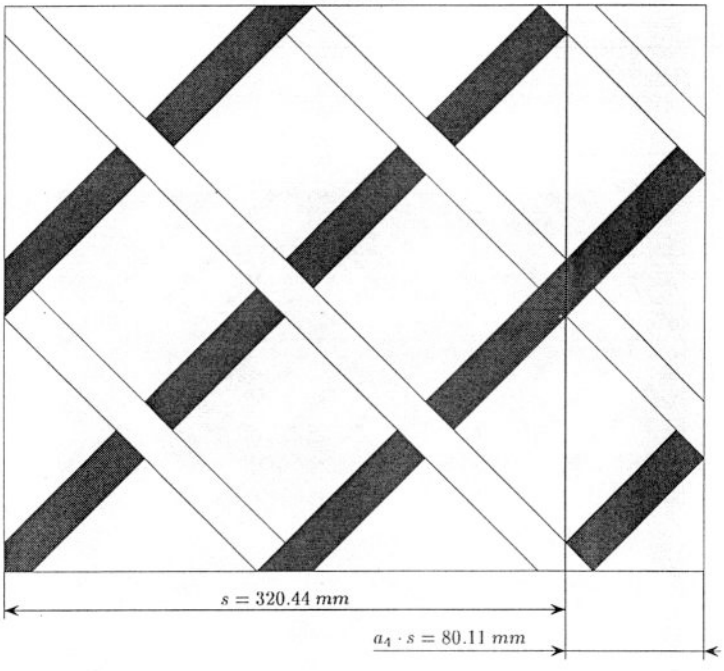
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 8/3



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

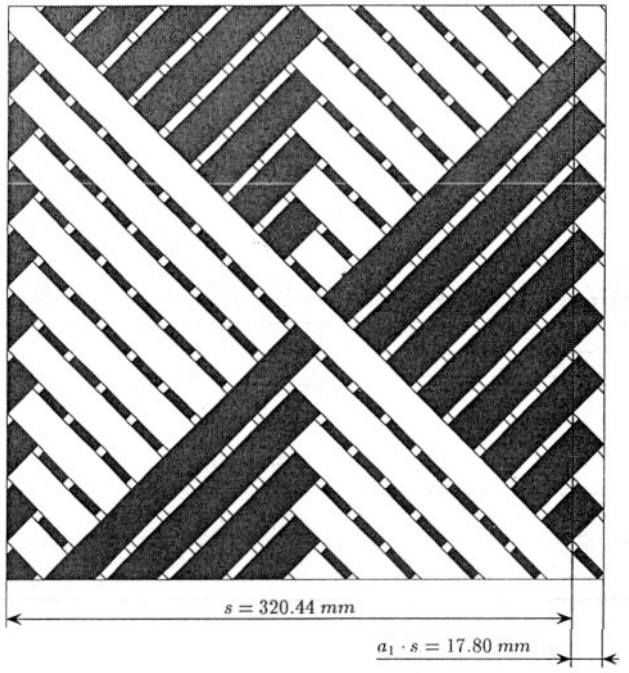
Tablica 8/4



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

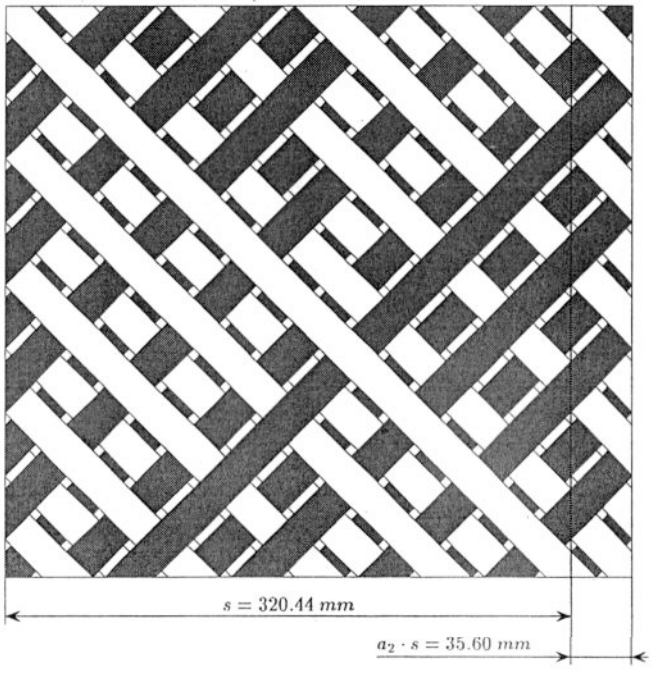
Liczba wiązek rowingu: 9										$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$									$= Nr/(2 \cdot 9)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1/18
2	5	1	6	2	7	3	8	4	9	2/18
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	3/18
4	7	5	3	1	8	6	4	2	9	4/18

Tablica 9/1



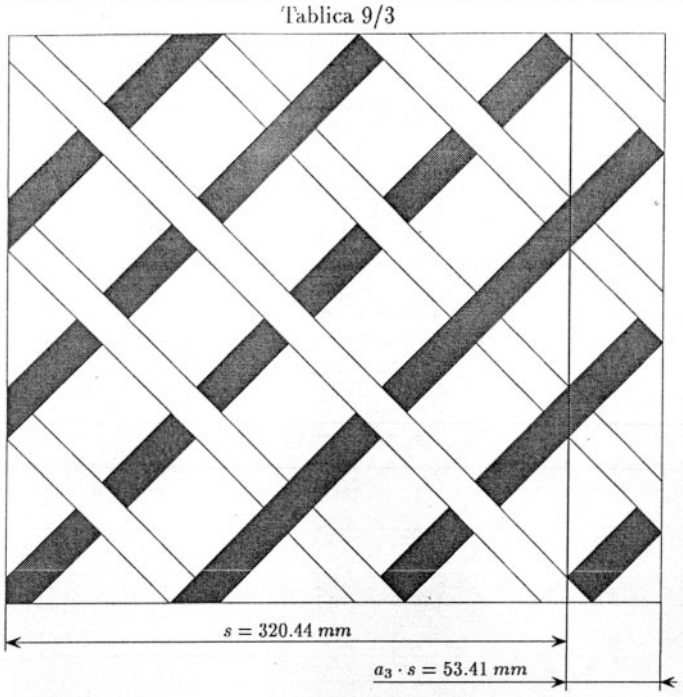
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 9/2



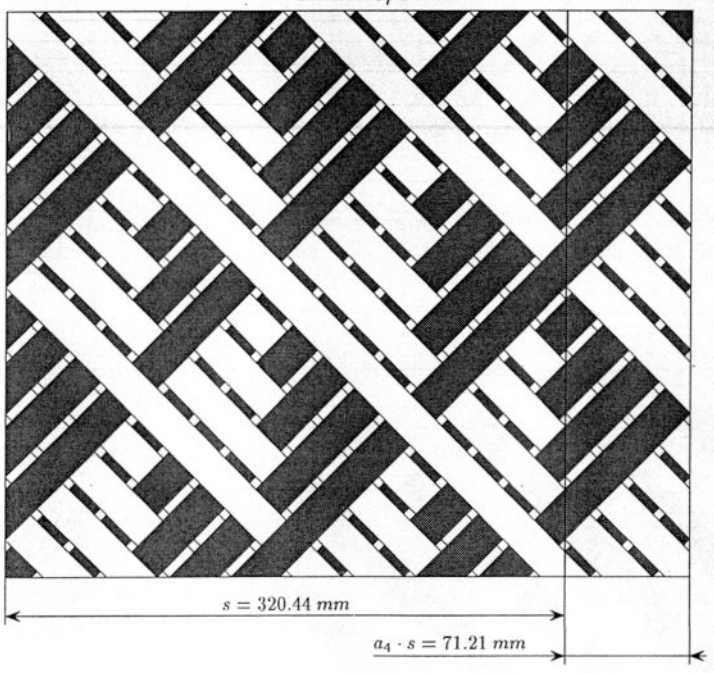
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 9/3



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

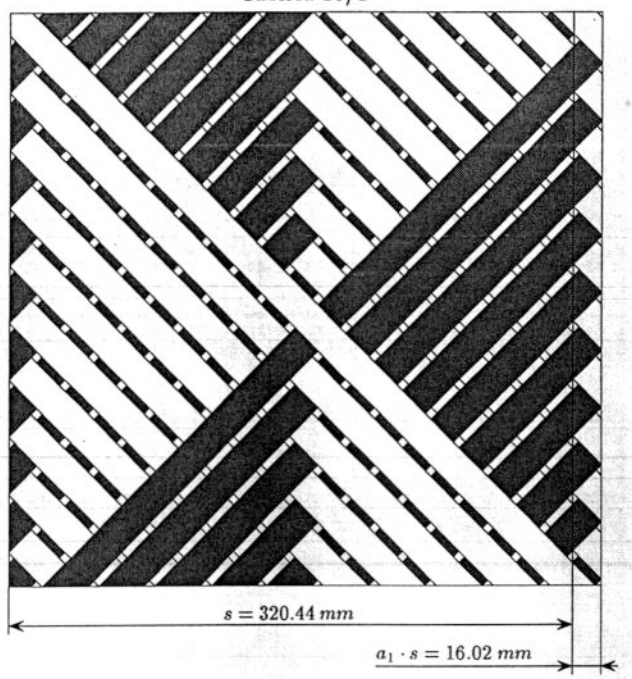
Tablica 9/4



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

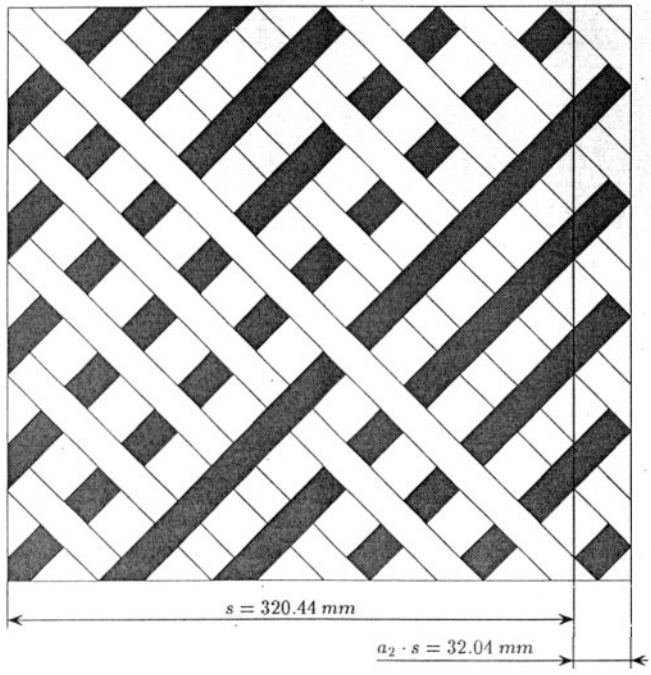
Liczba wiązek rowingu: 10											$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$										$= Nr/(2 \cdot 10)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1/20
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	2/20
3	7	4	1	8	5	2	9	6	3	10	3/20
4	0	3	0	1	0	4	0	2	0	5	4/20
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	5/20

Tablica 10/1



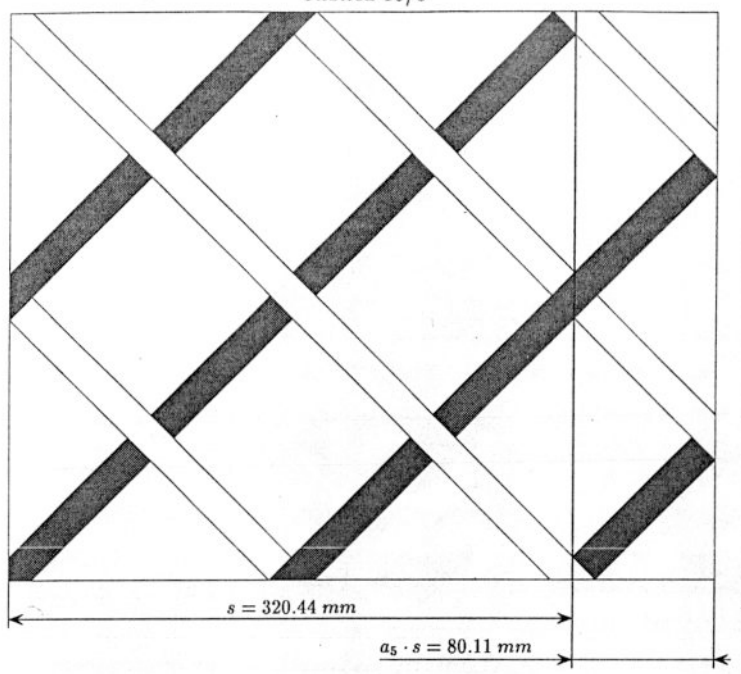
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 10/2



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

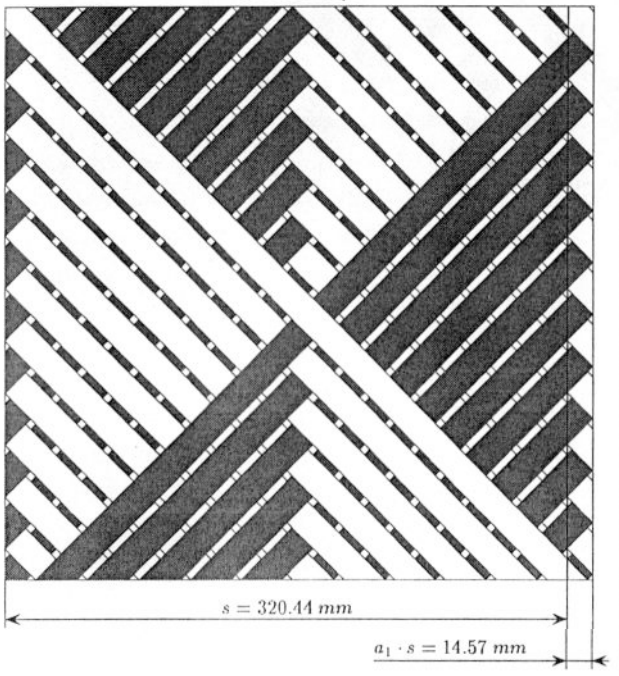
Tablica 10/5



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

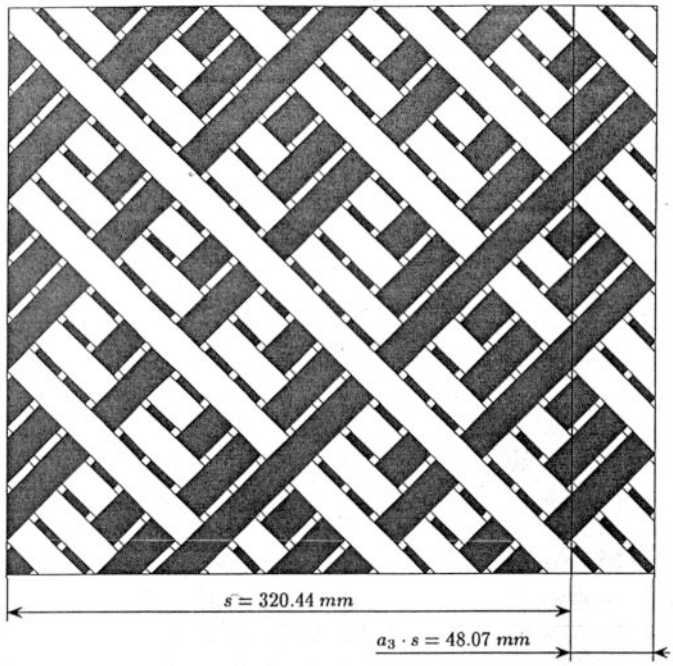
Liczba wiązek rowingu: 11												$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →											$= Nr/(2 \cdot 11)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1/22
2	6	1	7	2	8	3	9	4	10	5	11	2/22
3	4	8	1	5	9	2	6	10	3	7	11	3/22
4	3	6	9	1	4	7	10	2	5	8	11	4/22
5	9	7	5	3	1	10	8	6	4	2	11	5/22

Tablica 11/1



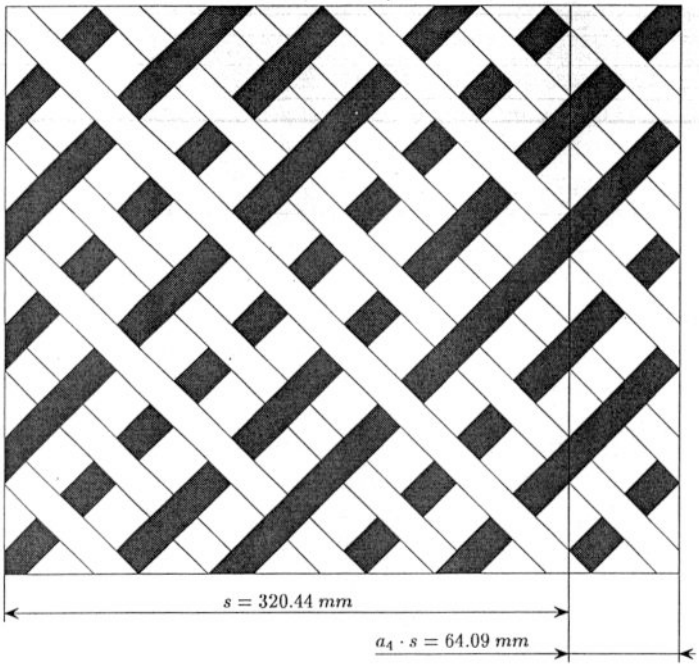
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 10/3



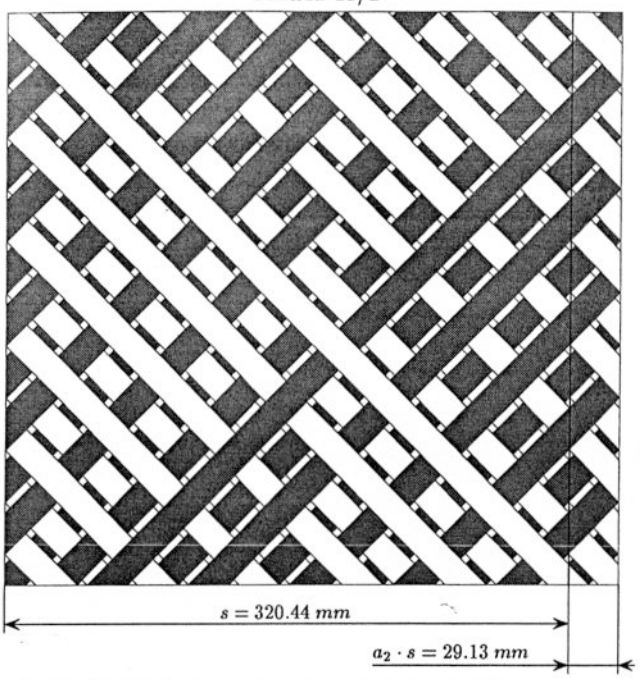
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 10/4



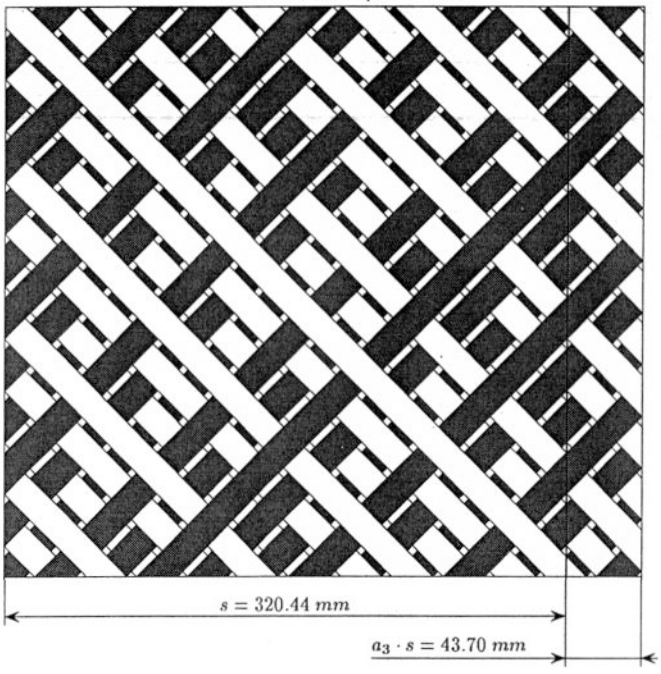
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 11/2



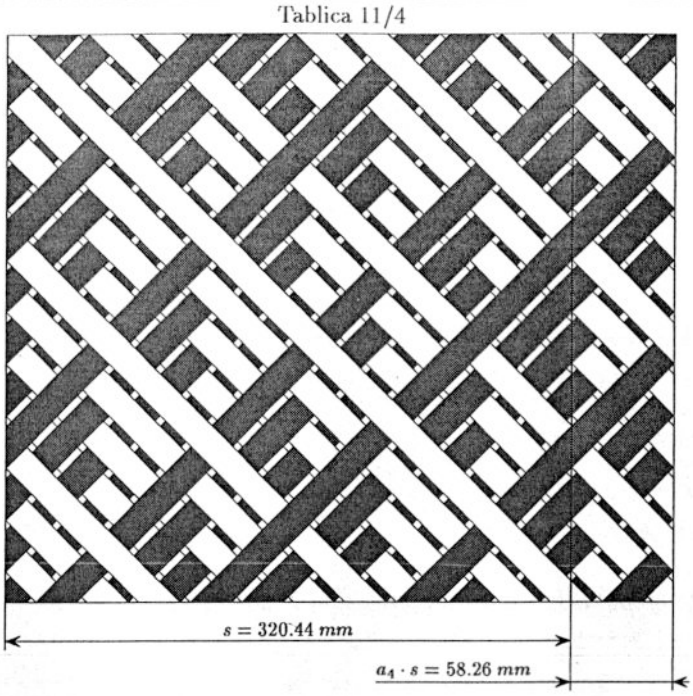
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 11/3



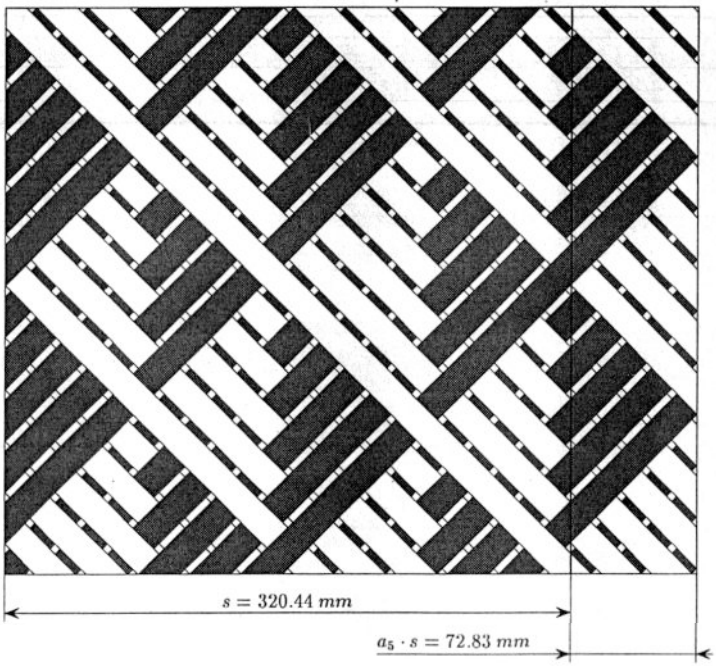
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 11/4



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

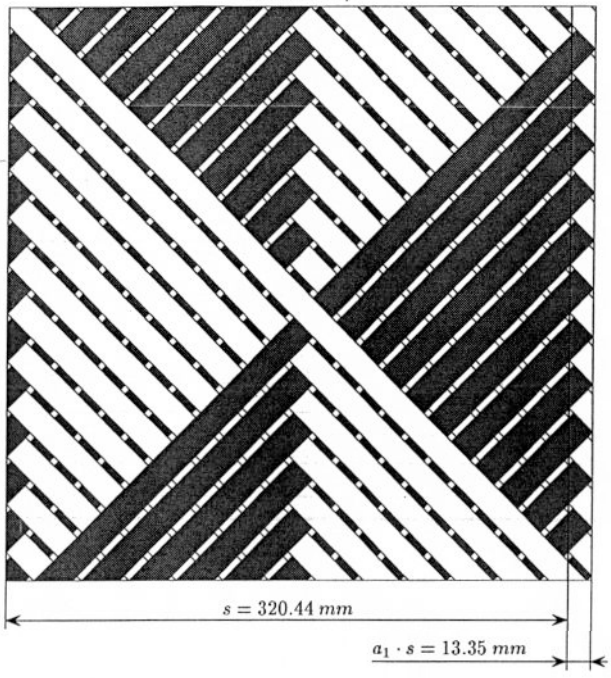
Tablica 11/5



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

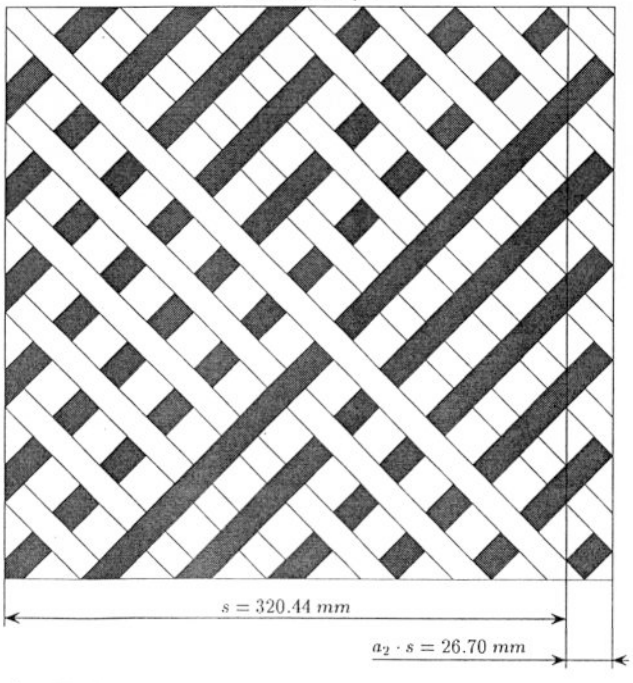
Liczba wiązek rowingu: 12													$a_{Nr} =$
Nr	←					$\pi \cdot d$						→	$= Nr/(2 \cdot 12)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1/24
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	2/24
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	3/24
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	4/24
5	5	10	3	8	1	6	11	4	9	2	7	12	5/24
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	6/24

Tablica 12/1



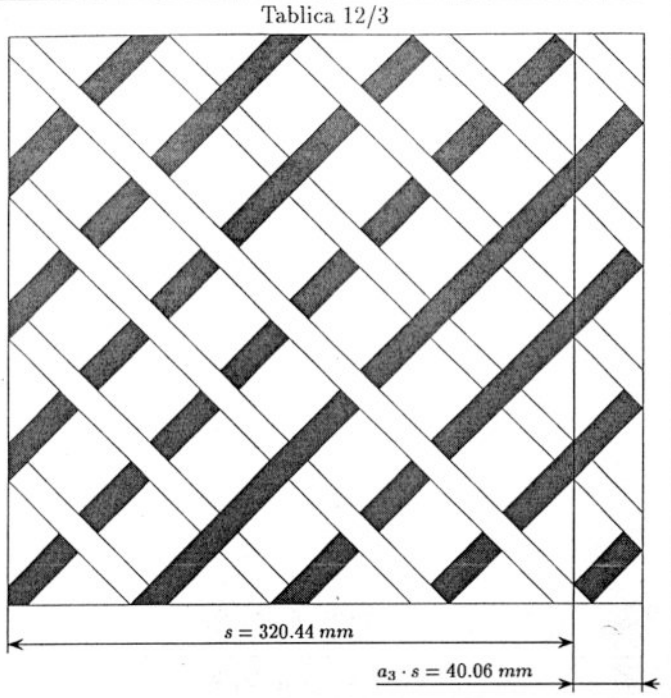
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 12/2



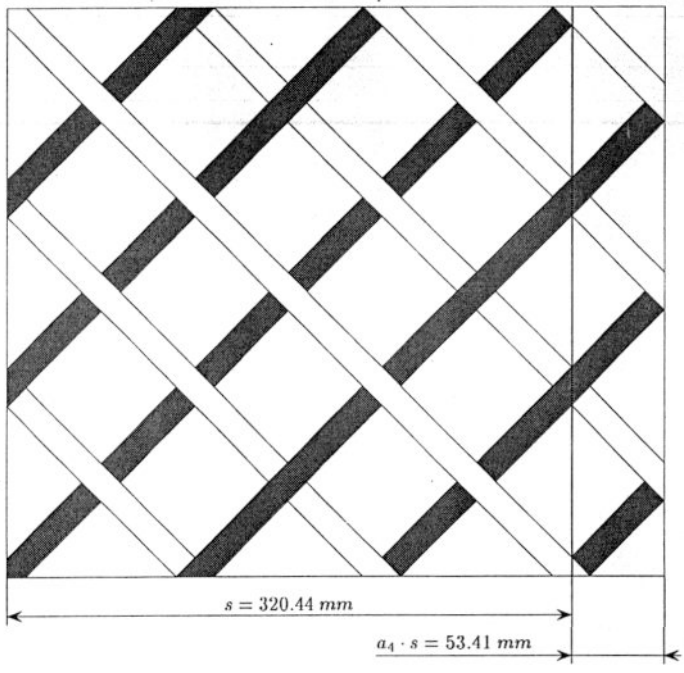
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 12/3



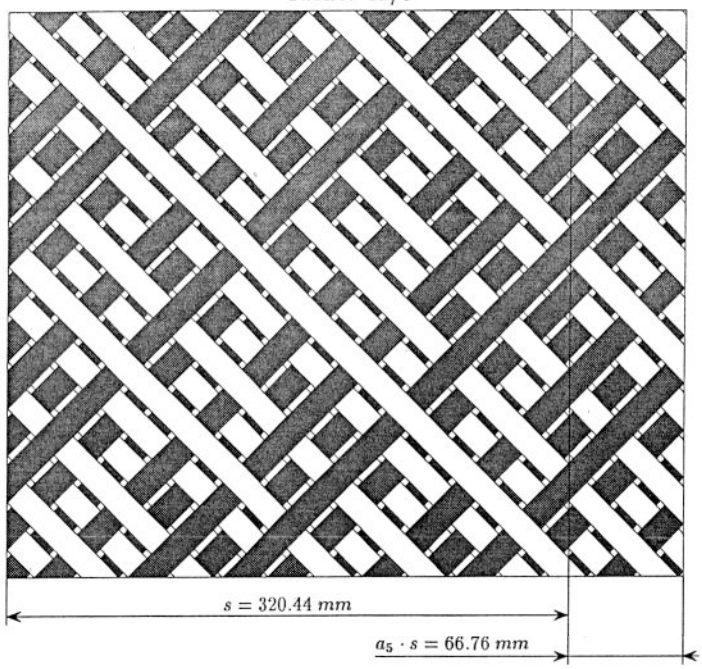
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 12/4



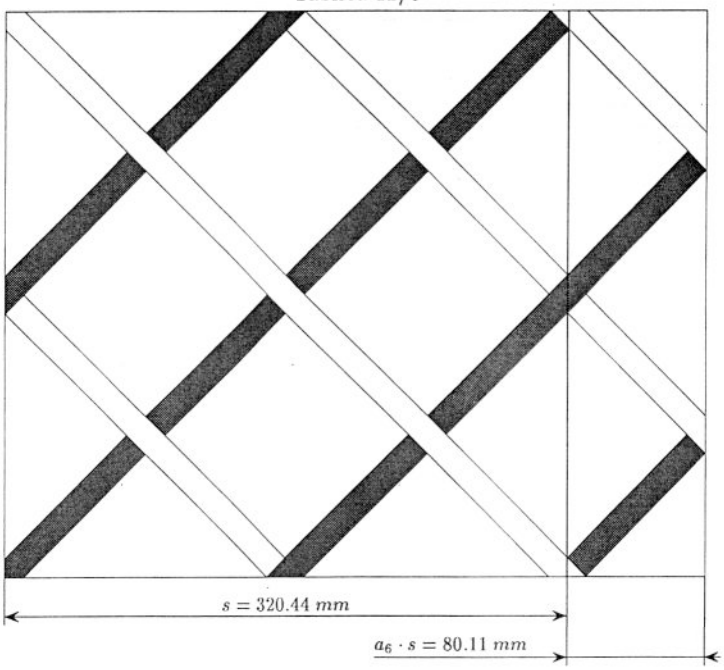
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 12/5



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

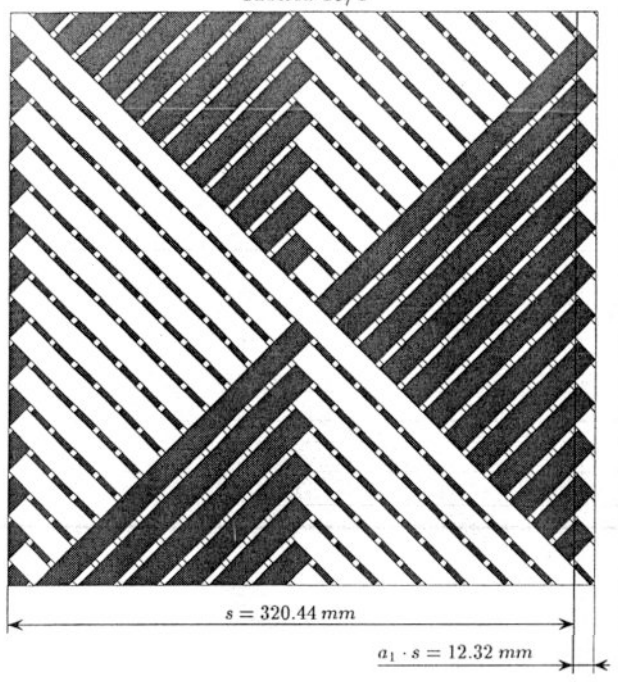
Tablica 12/6



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

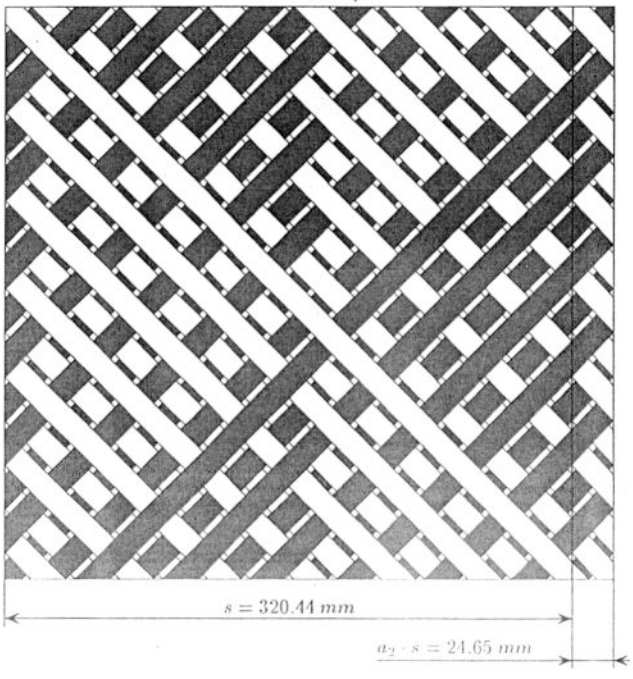
Liczba wiązek rowingu: 13														$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$													$= Nr/(2 \cdot 13)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1/26
2	7	1	8	2	9	3	10	4	11	5	12	6	13	2/26
3	9	5	1	10	6	2	11	7	3	12	8	4	13	3/26
4	10	7	4	1	11	8	5	2	12	9	6	3	13	4/26
5	8	3	11	6	1	9	4	12	7	2	10	5	13	5/26
6	11	9	7	5	3	1	12	10	8	6	4	2	13	6/26

Tablica 13/1



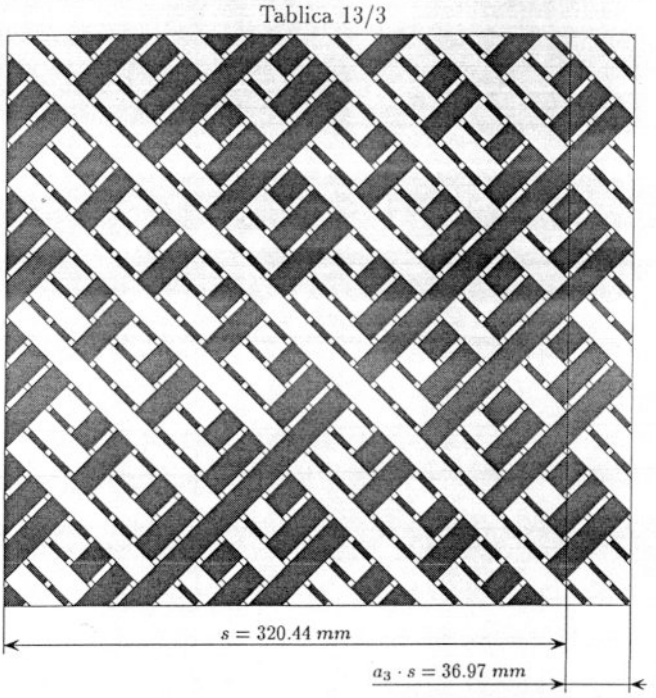
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 13/2



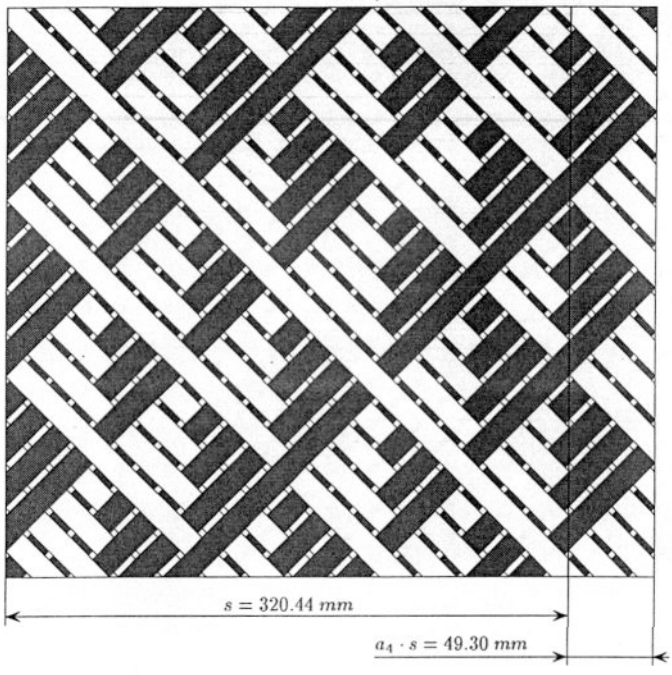
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 13/3



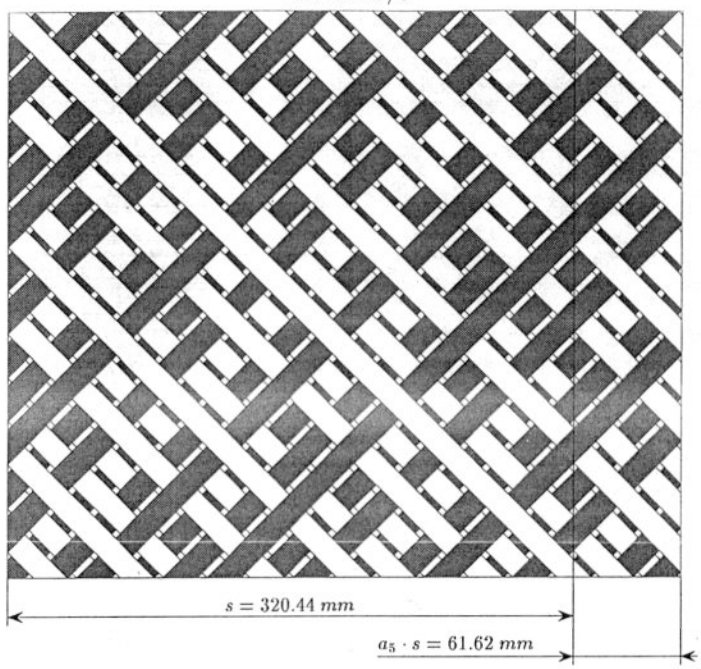
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 13/4



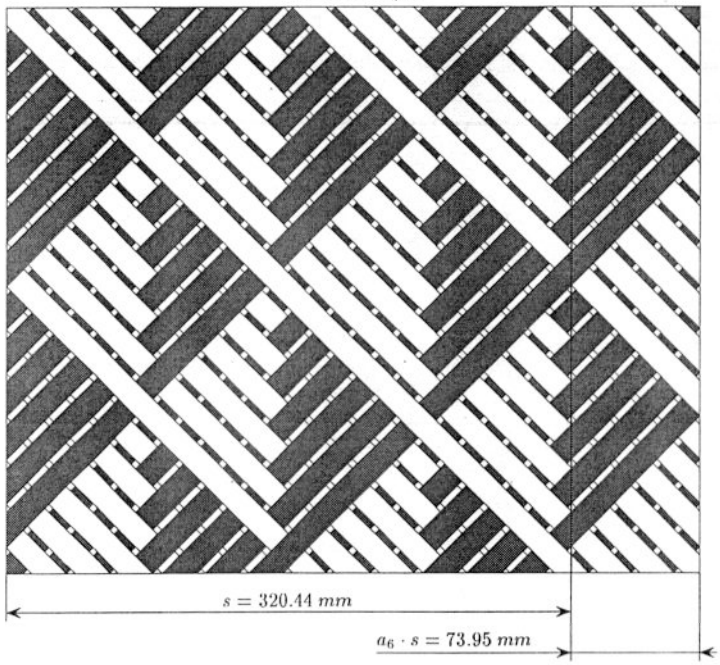
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 13/5



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

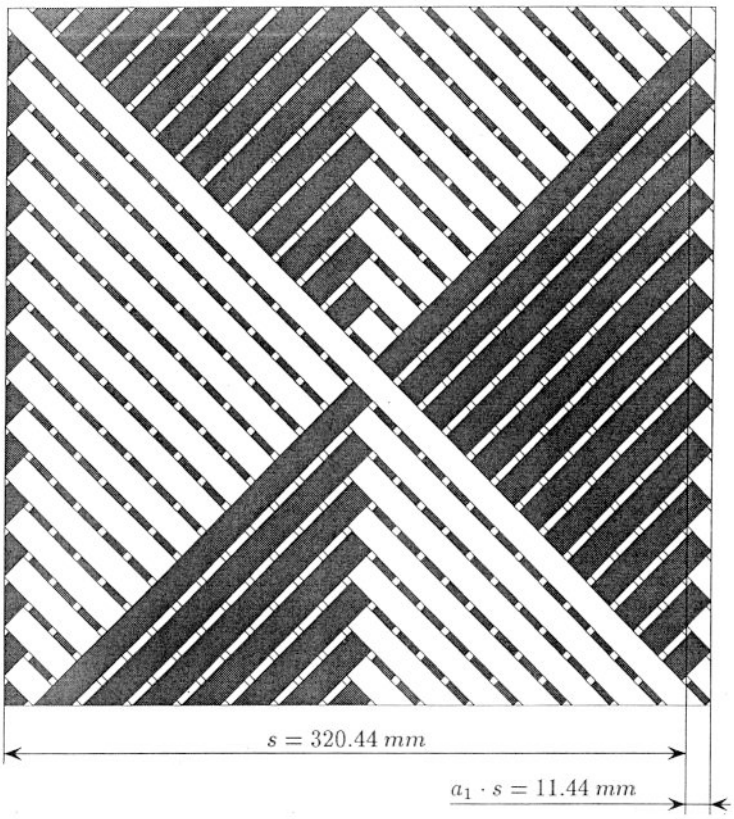
Tablica 13/6



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

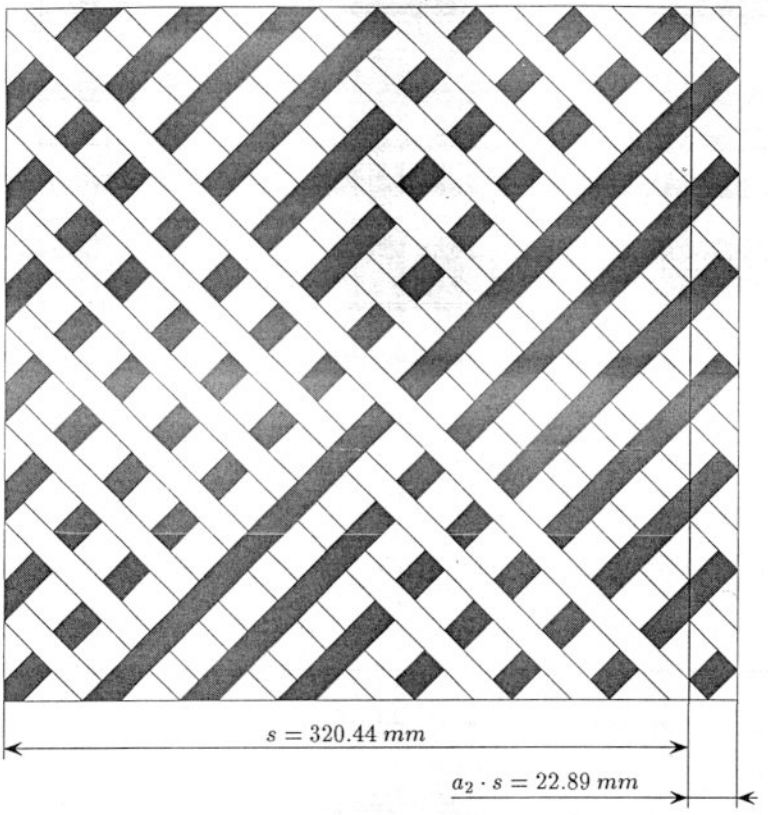
Liczba wiązek rowingu: 14															$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$														$= Nr/(2 \cdot 14)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1/28
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	2/28
3	5	10	1	6	11	2	7	12	3	8	13	4	9	14	3/28
4	0	4	0	1	0	5	0	2	0	6	0	3	0	7	4/28
5	3	6	9	12	1	4	7	10	13	2	5	8	11	14	5/28
6	0	5	0	3	0	1	0	6	0	4	0	2	0	7	6/28
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	7/28

Tablica 14/1



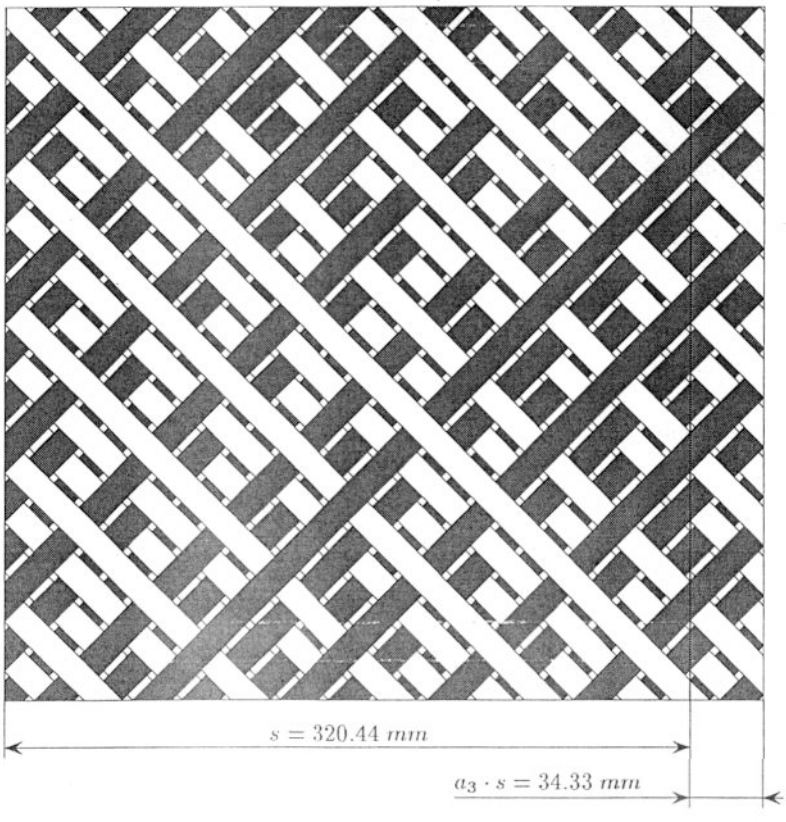
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 14/2



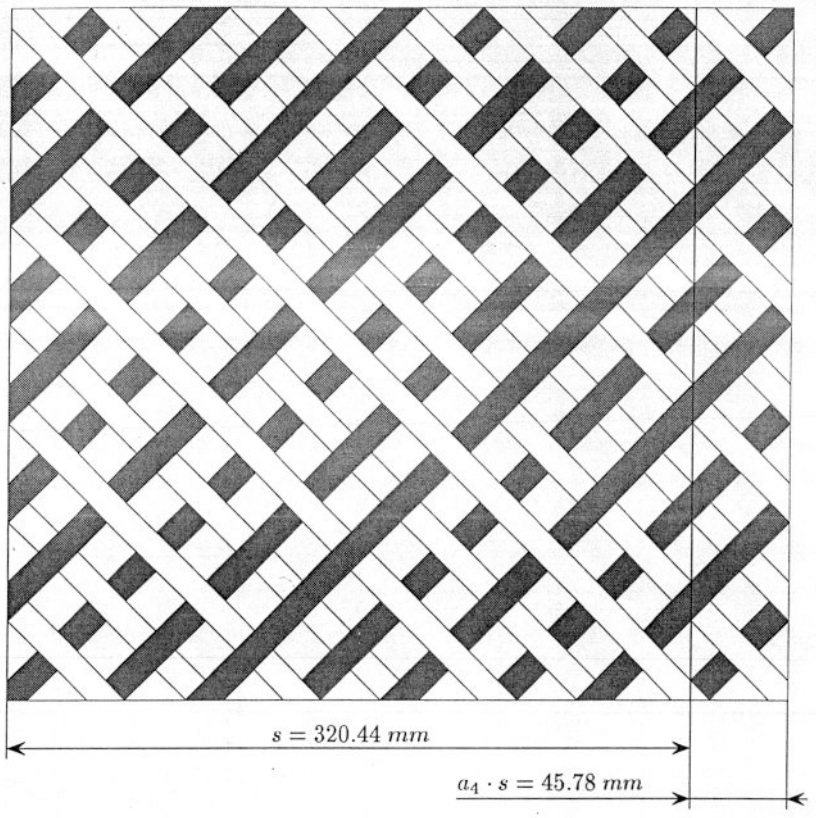
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 14/3



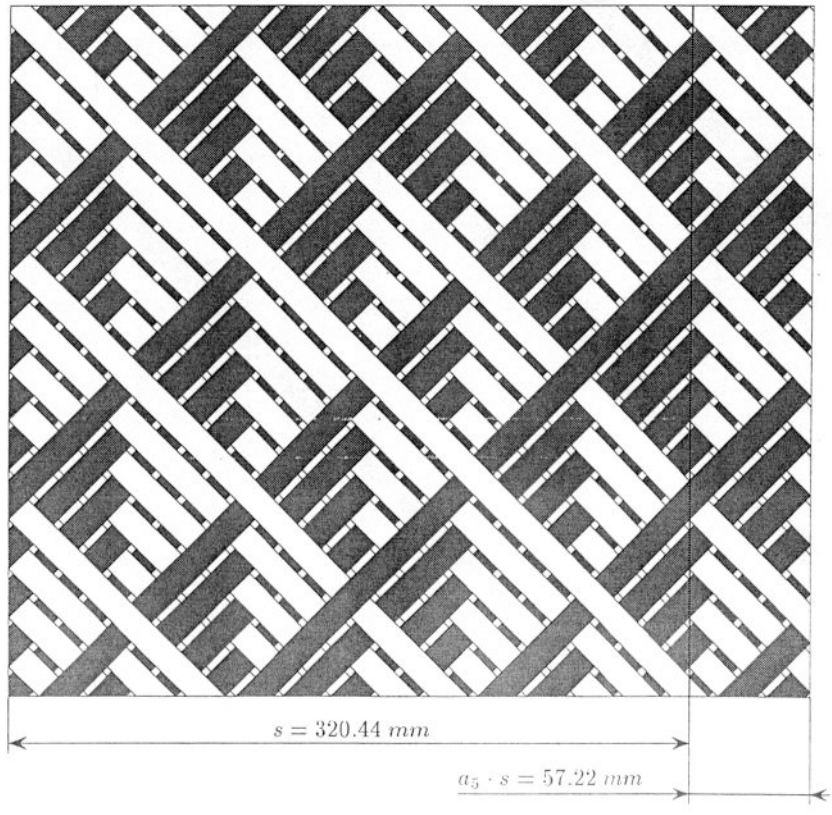
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 14/4



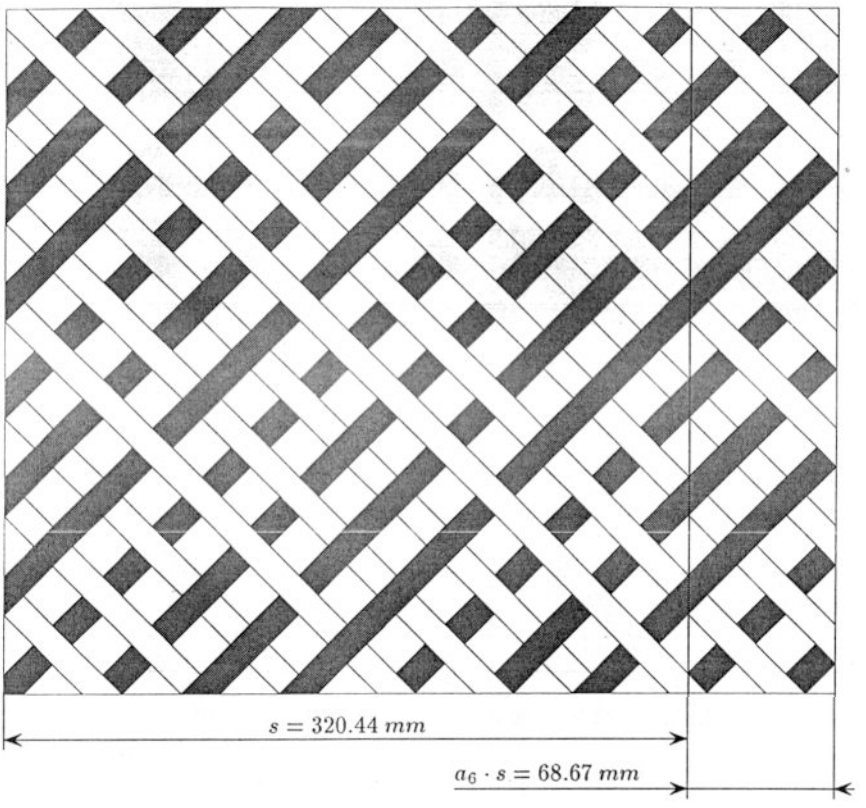
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 14/5



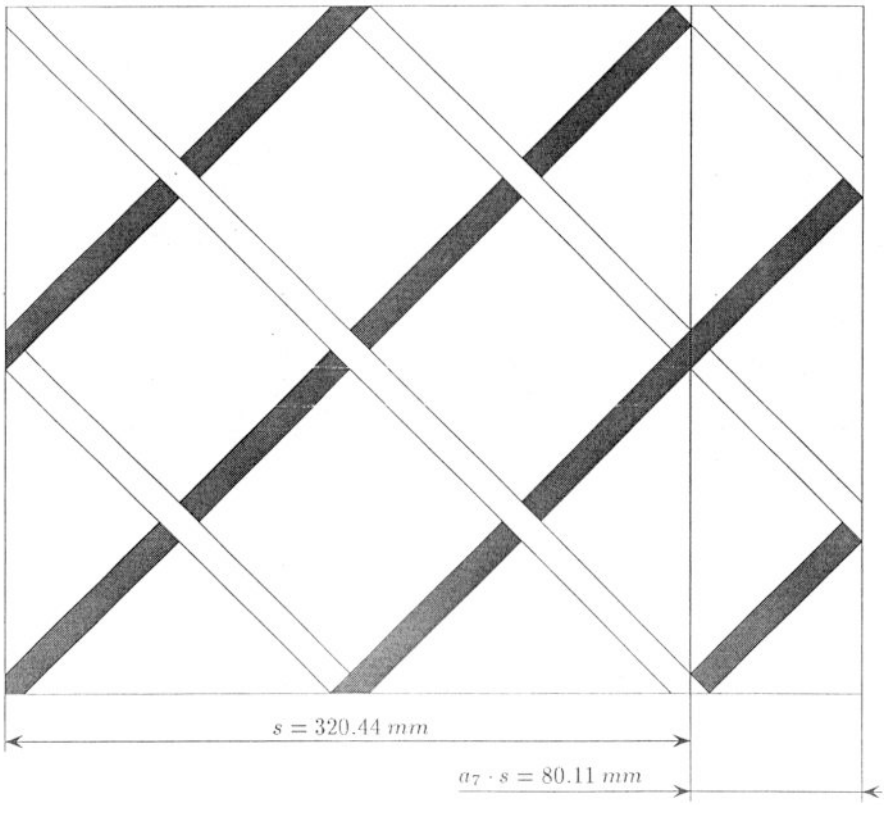
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 14/6



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

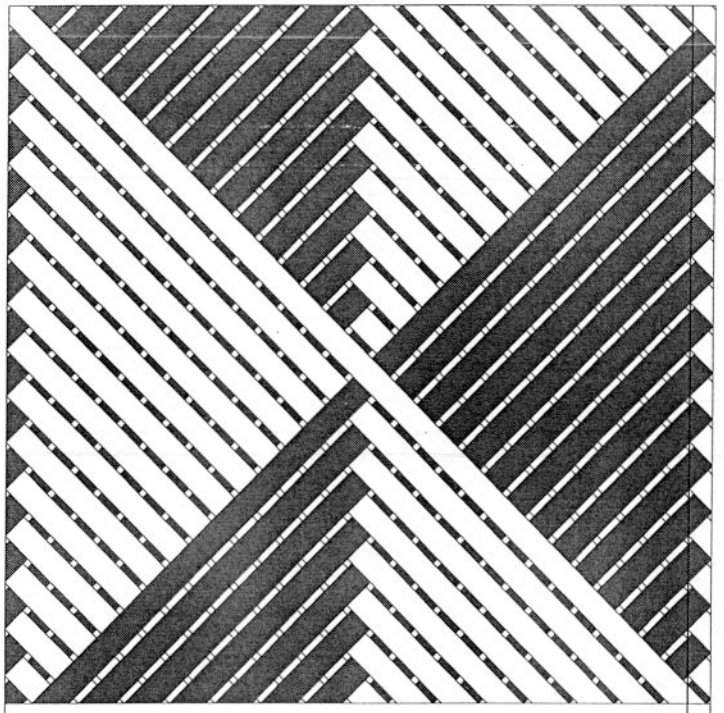
Tablica 14/7



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

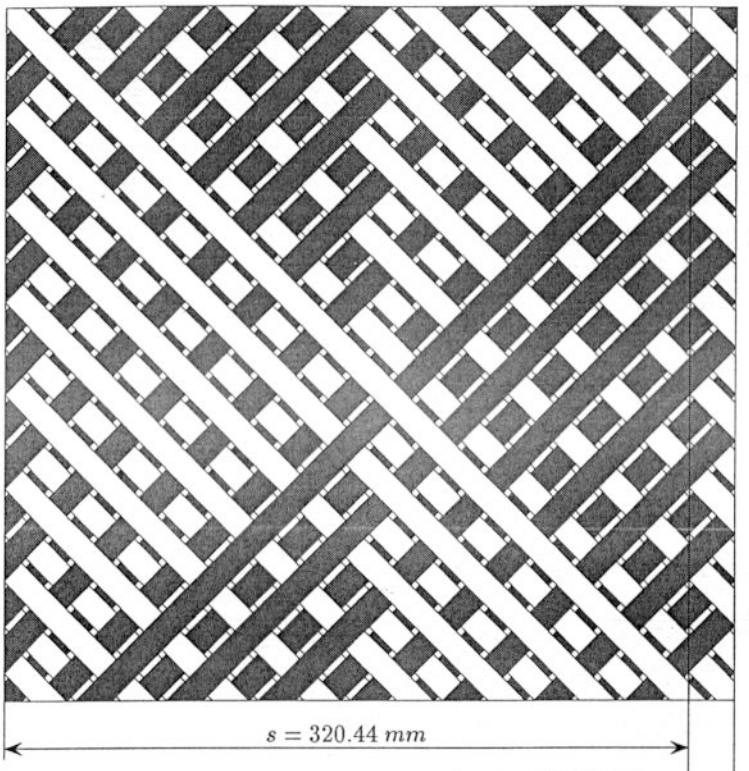
Liczba wiązek rowingu: 15																$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$															$= Nr/(2 \cdot 15)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1/30
2	8	1	9	2	10	3	11	4	12	5	13	6	14	7	15	2/30
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	3/30
4	4	8	12	1	5	9	13	2	6	10	14	3	7	11	15	4/30
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	5/30
6	0	0	3	0	0	1	0	0	4	0	0	2	0	0	5	6/30
7	13	11	9	7	5	3	1	14	12	10	8	6	4	2	15	7/30

Tablica 15/1



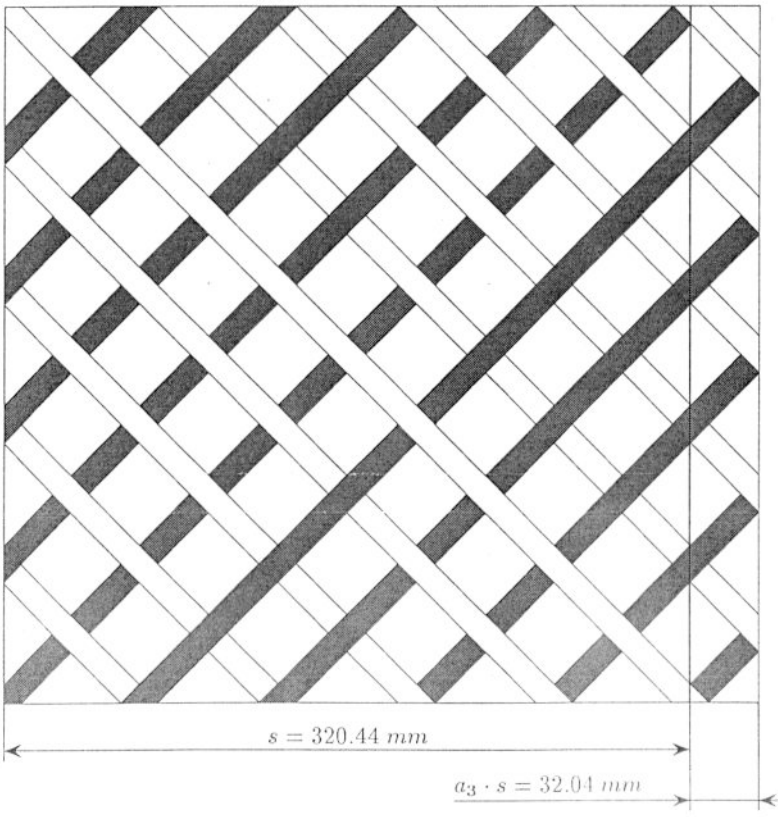
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 15/2



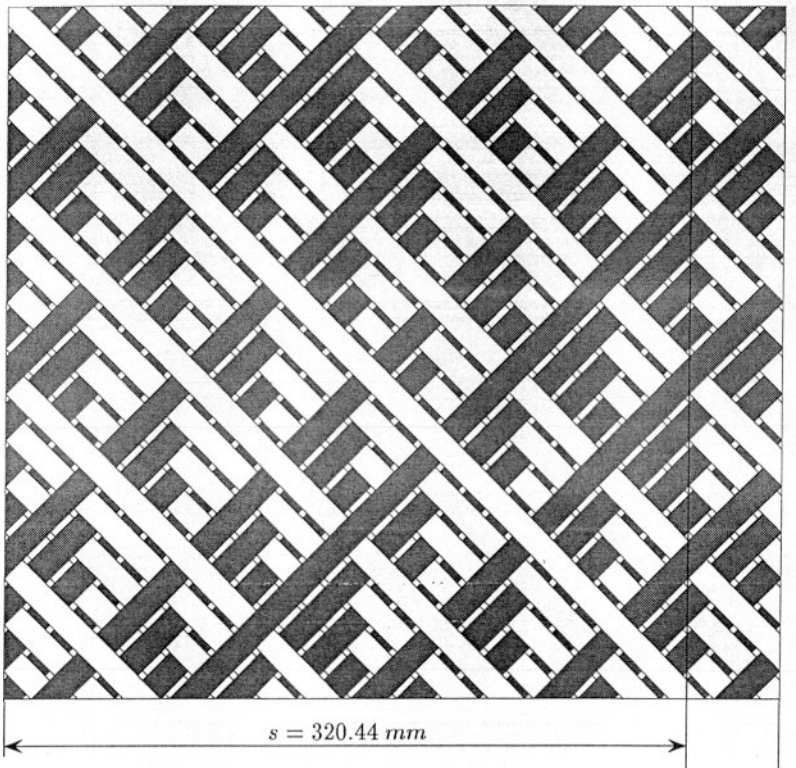
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 15/3



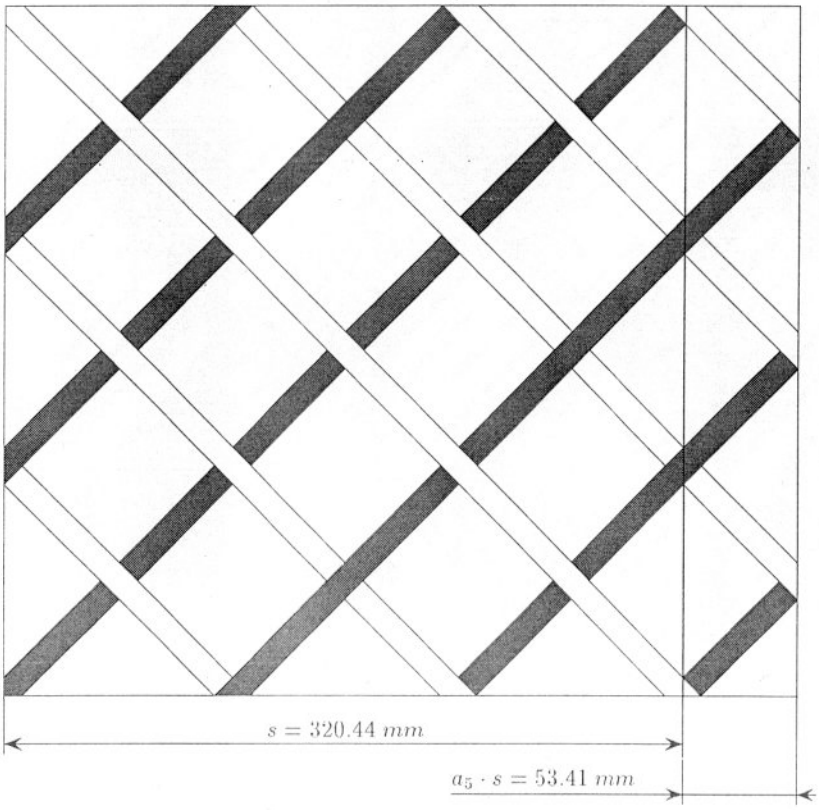
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 15/4



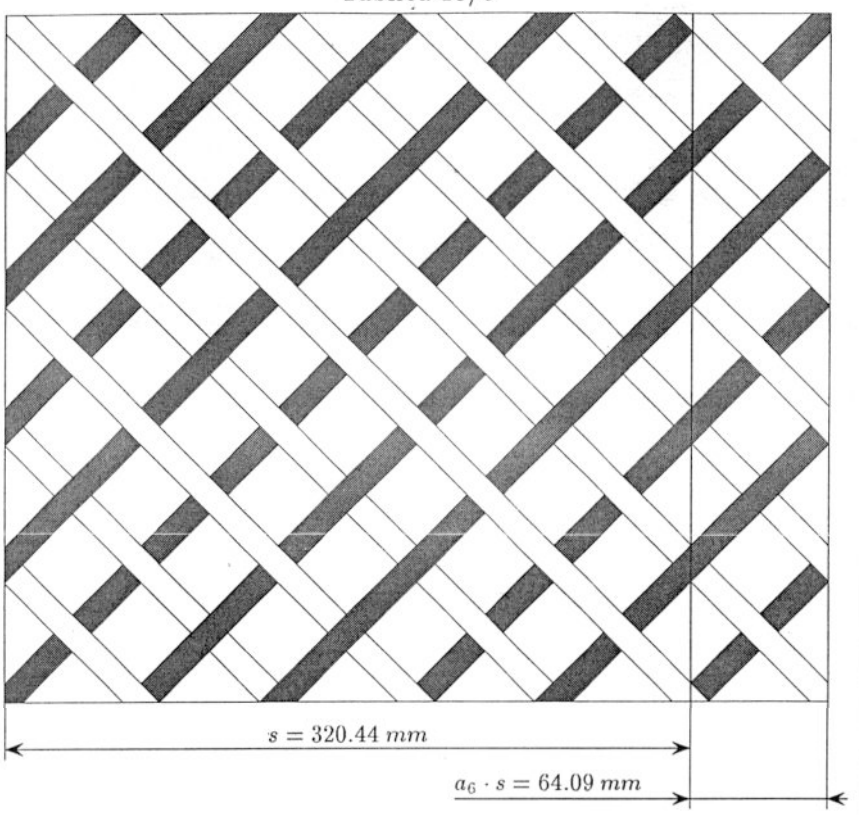
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 15/5



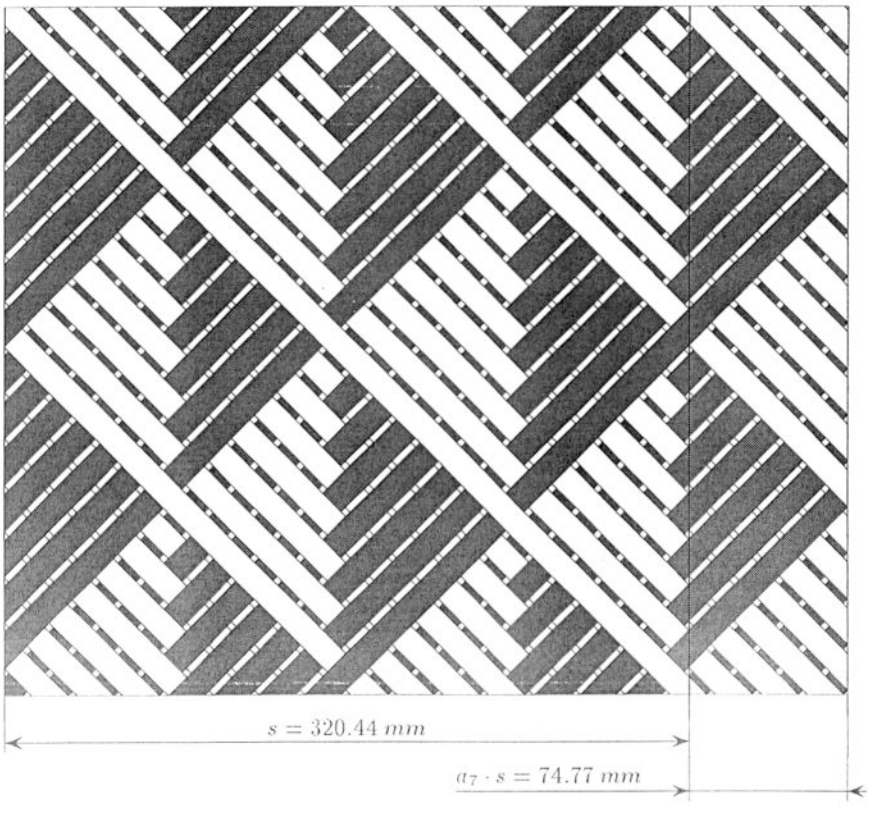
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 15/6



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

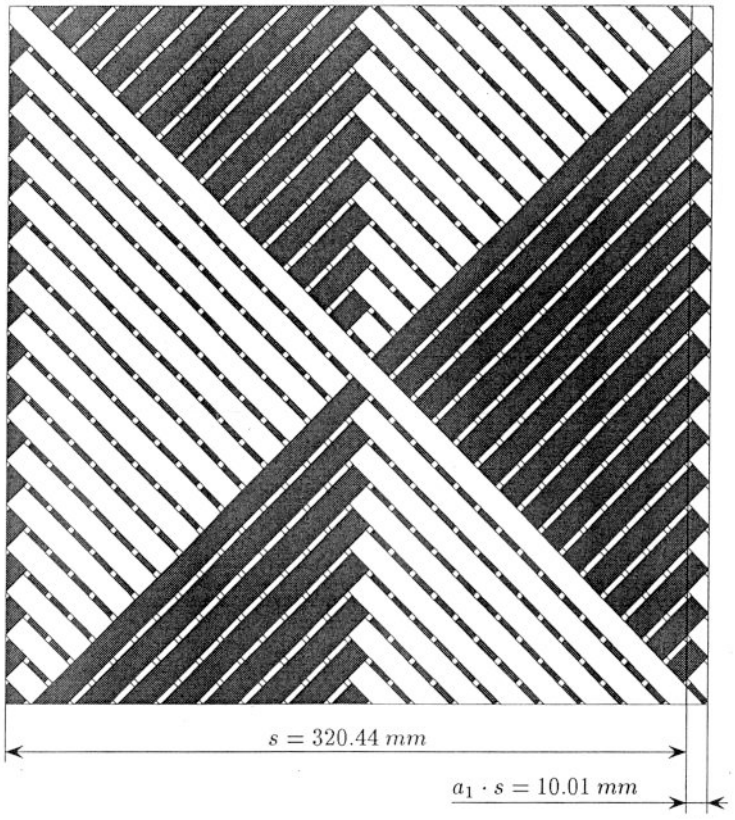
Tablica 15/7



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

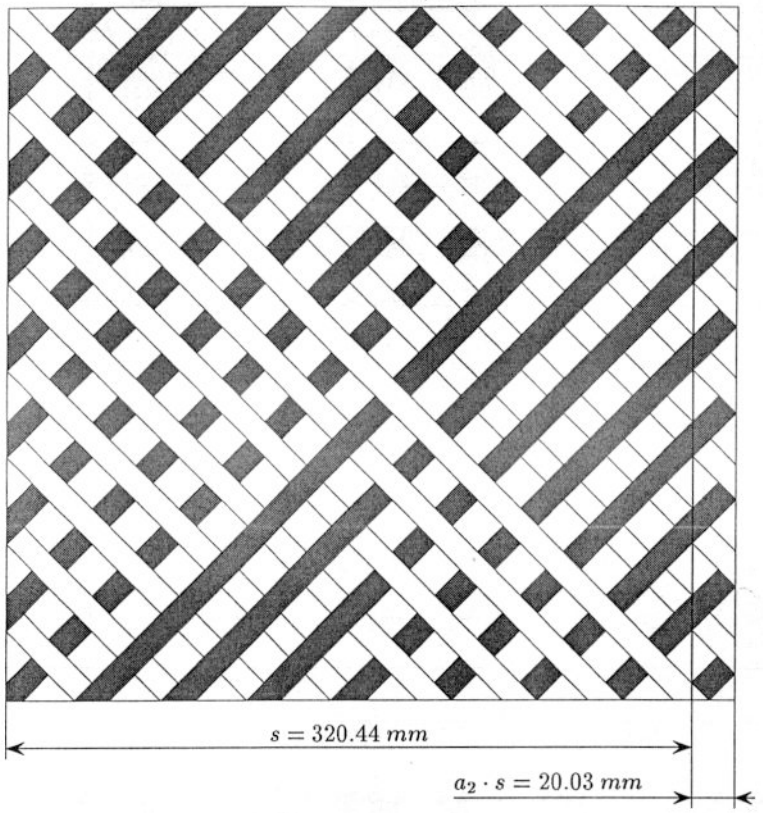
Liczba wiązek rowingu: 16																	$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow$																$= Nr/(2 \cdot 16)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1/32
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	2/32
3	11	6	1	12	7	2	13	8	3	14	9	4	15	10	5	16	3/32
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	4/32
5	13	10	7	4	1	14	11	8	5	2	15	12	9	6	3	16	5/32
6	0	3	0	6	0	1	0	4	0	7	0	2	0	5	0	8	6/32
7	7	14	5	12	3	10	1	8	15	6	13	4	11	2	9	16	7/32
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	8/32

Tablica 16/1



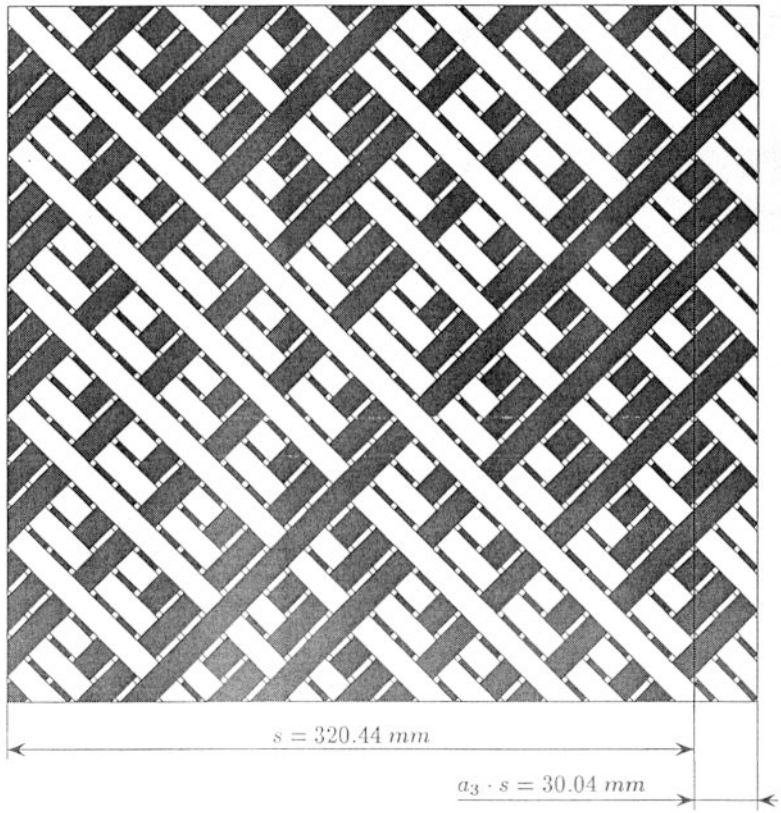
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 16/2



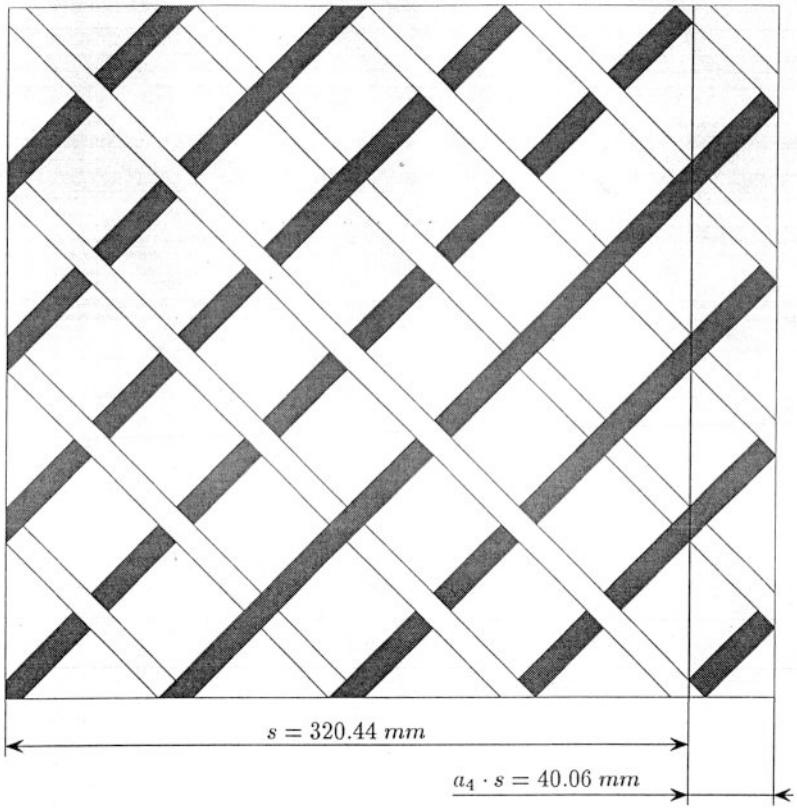
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 16/3



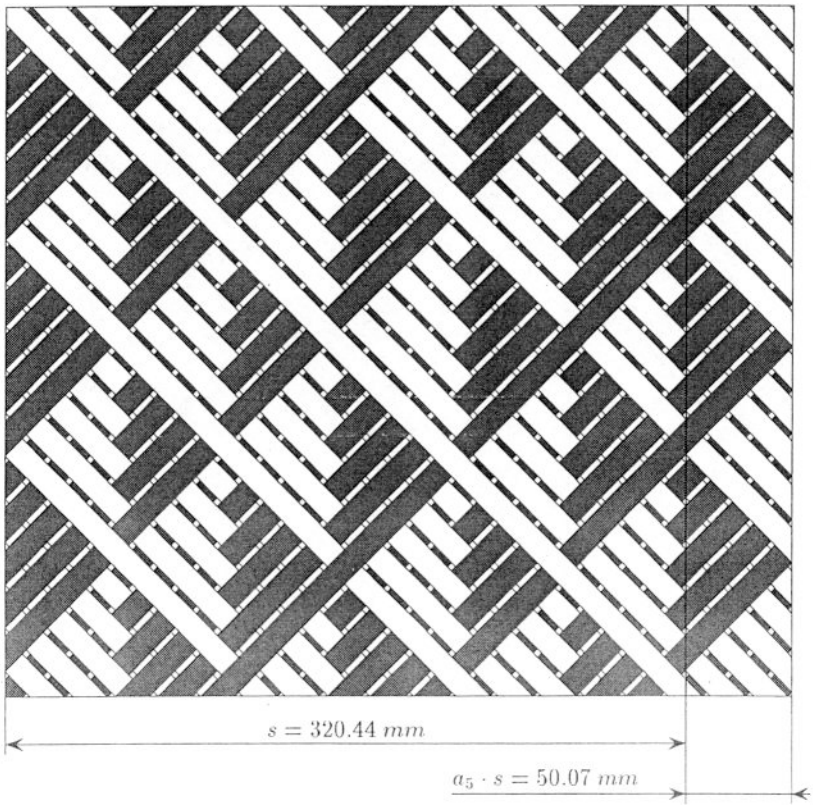
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 16/4



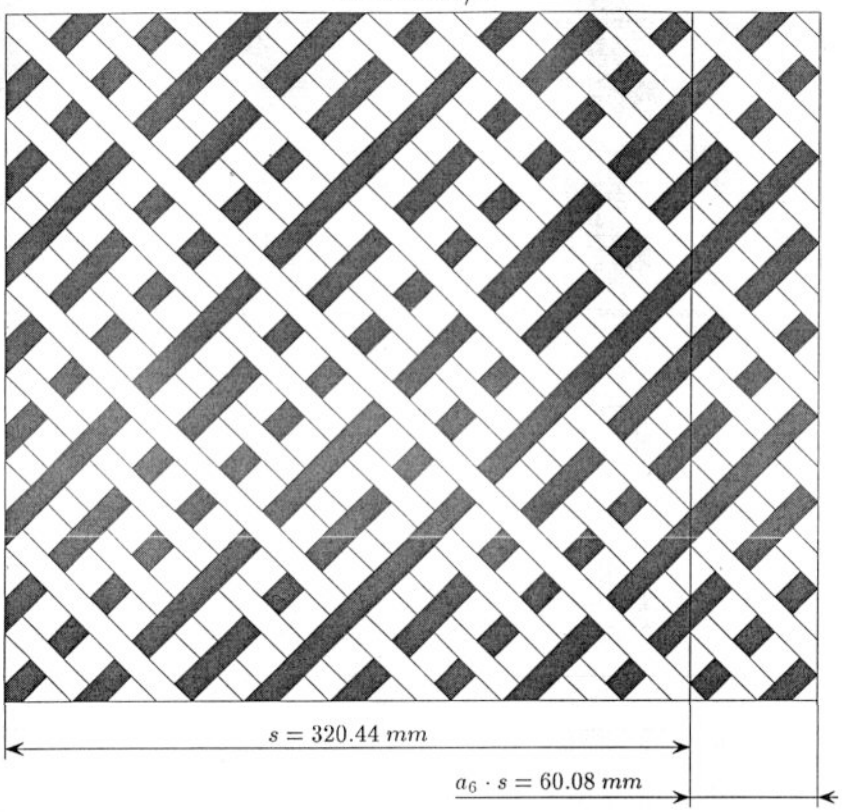
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 16/5



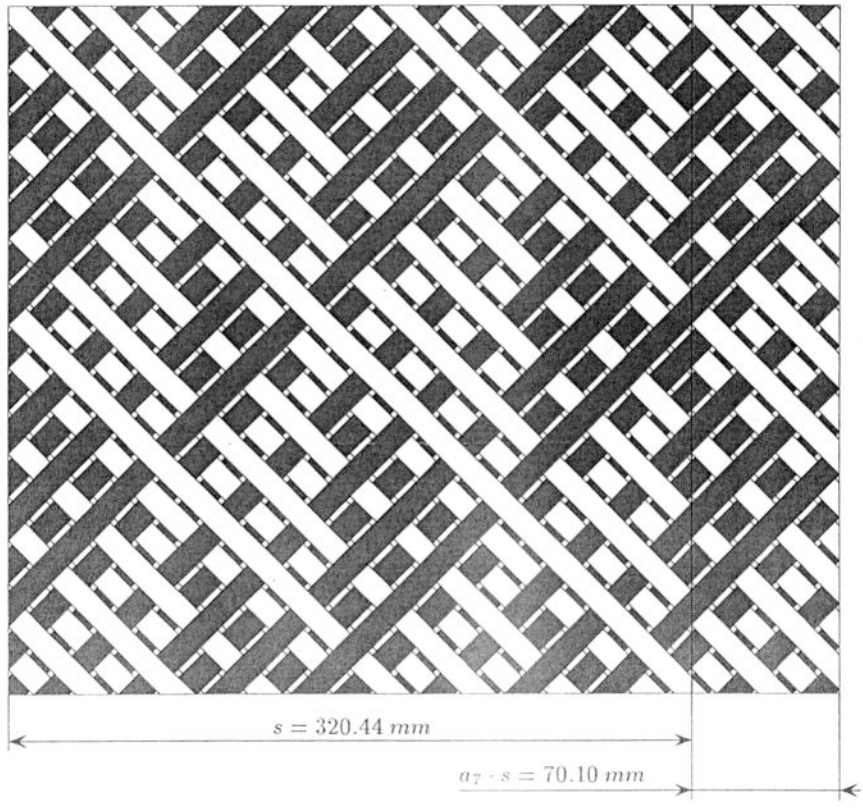
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 16/6



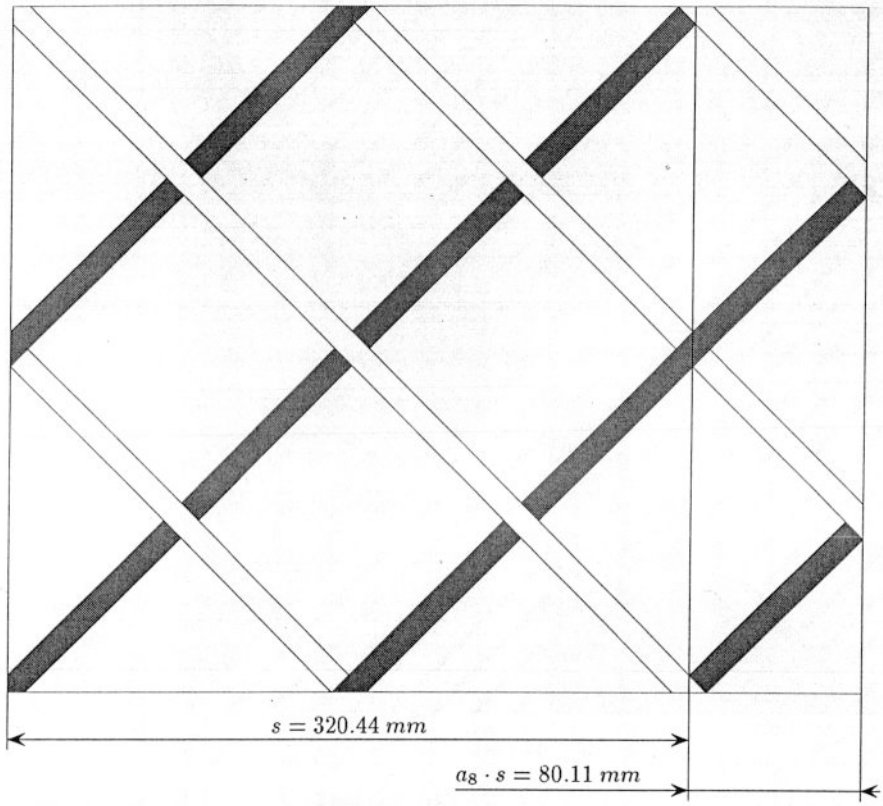
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 16/7



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

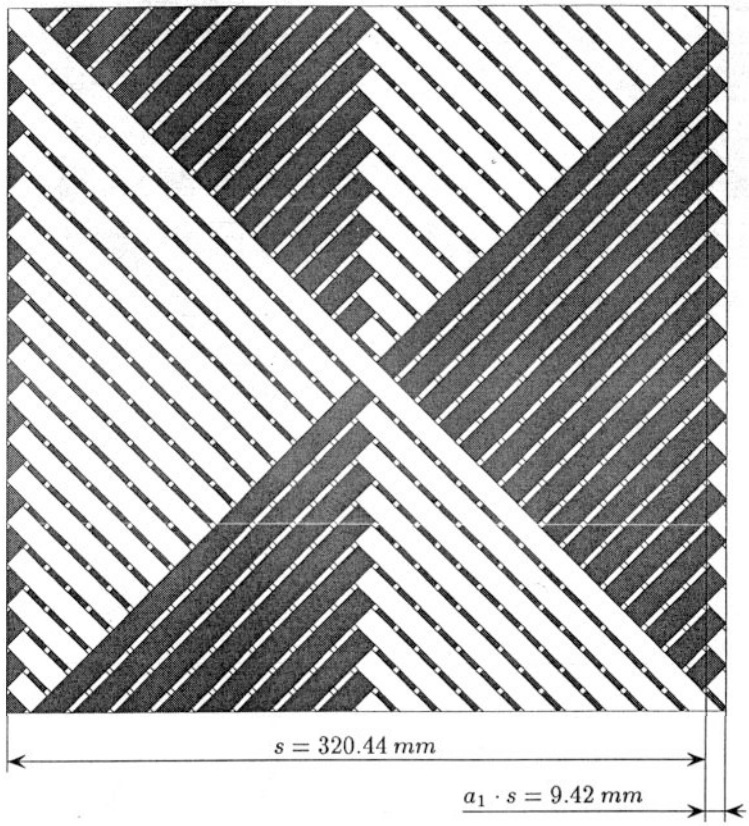
Tablica 16/8



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

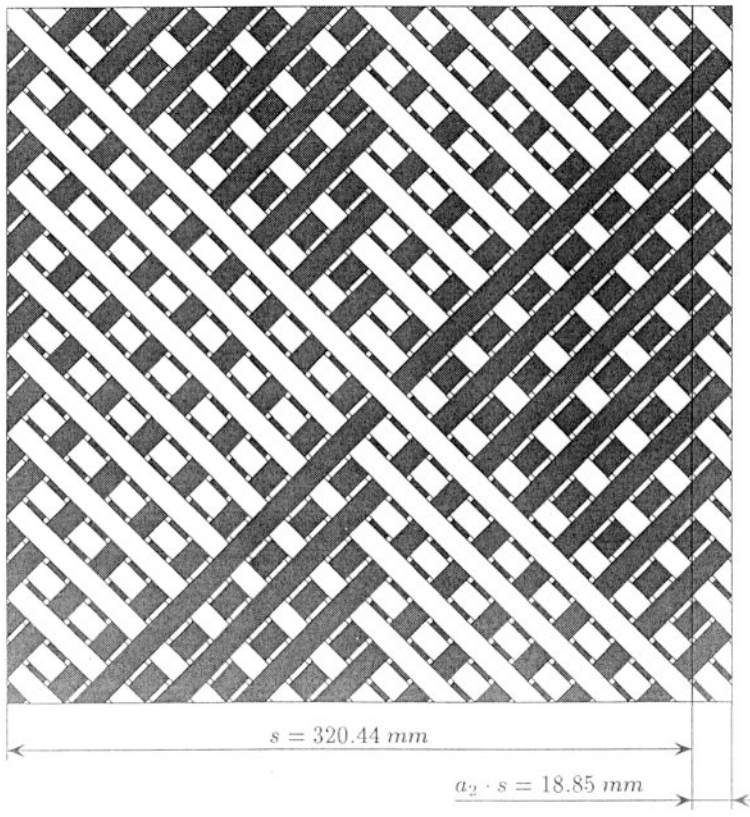
Liczba wiązek rowingu: 17																		$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$																	$= Nr/(2 \cdot 17)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1/34
2	9	1	10	2	11	3	12	4	13	5	14	6	15	7	16	8	17	2/34
3	6	12	1	7	13	2	8	14	3	9	15	4	10	16	5	11	17	3/34
4	13	9	5	1	14	10	6	2	15	11	7	3	16	12	8	4	17	4/34
5	7	14	4	11	1	8	15	5	12	2	9	16	6	13	3	10	17	5/34
6	3	6	9	12	15	1	4	7	10	13	16	2	5	8	11	14	17	6/34
7	5	10	15	3	8	13	1	6	11	16	4	9	14	2	7	12	17	7/34
8	15	13	11	9	7	5	3	1	16	14	12	10	8	6	4	2	17	8/34

Tablica 17/1



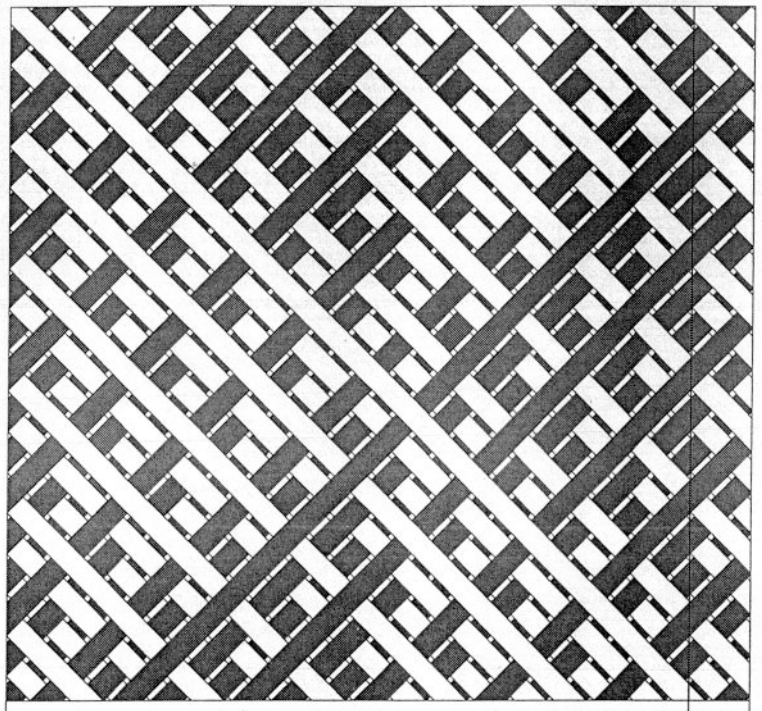
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 17/2



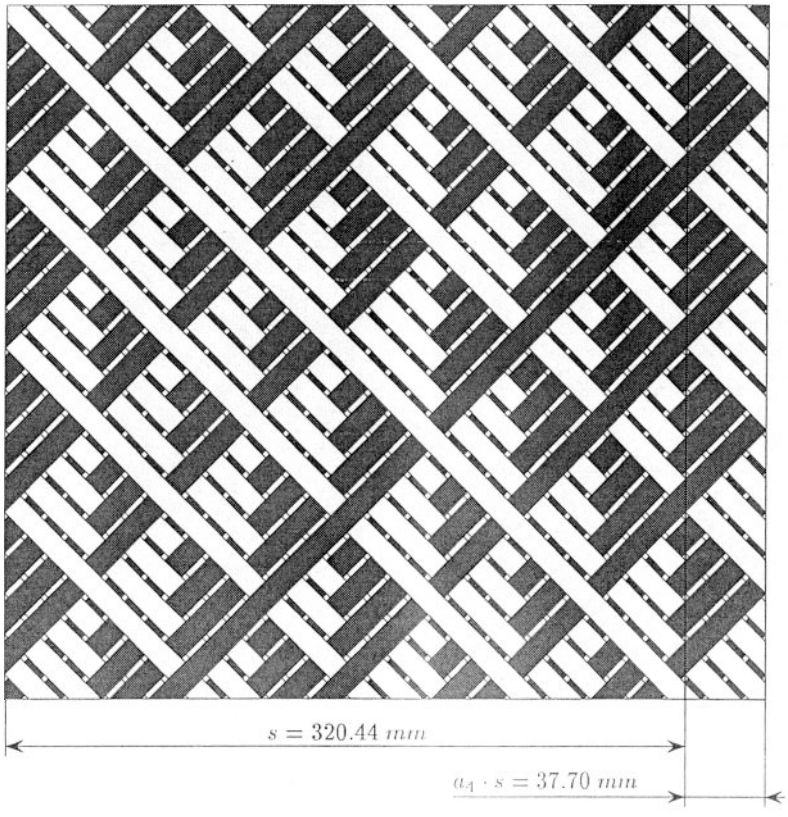
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 17/3



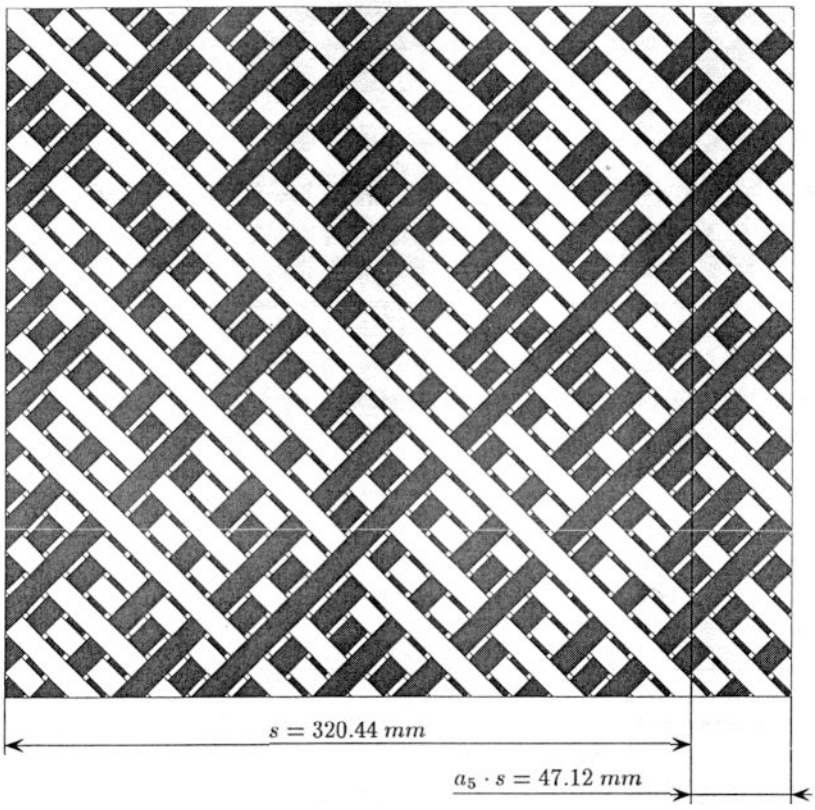
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 17/4



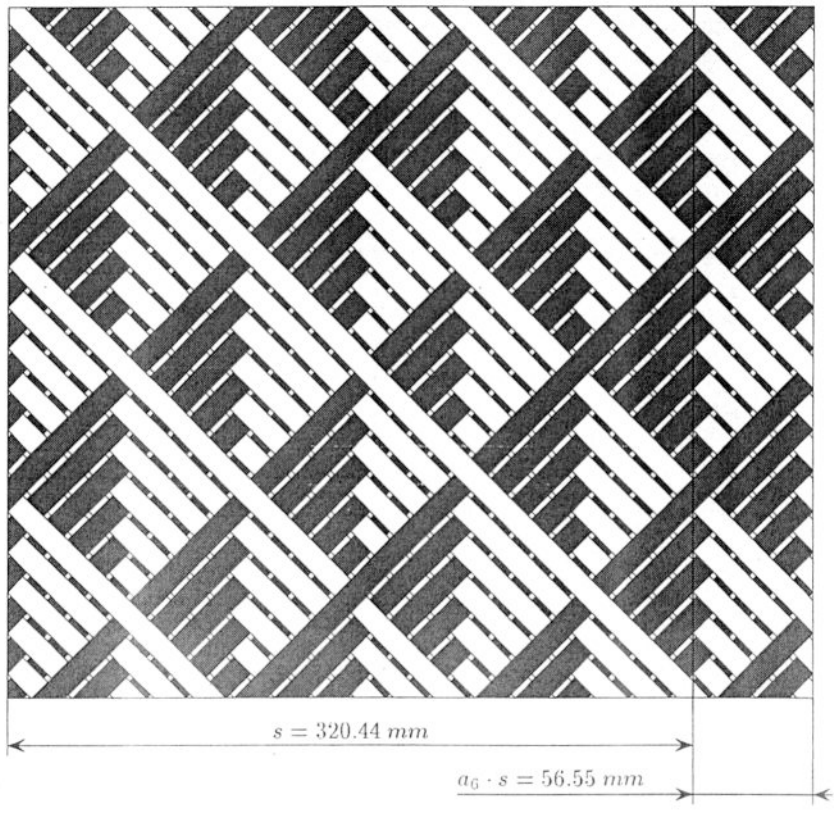
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 17/5



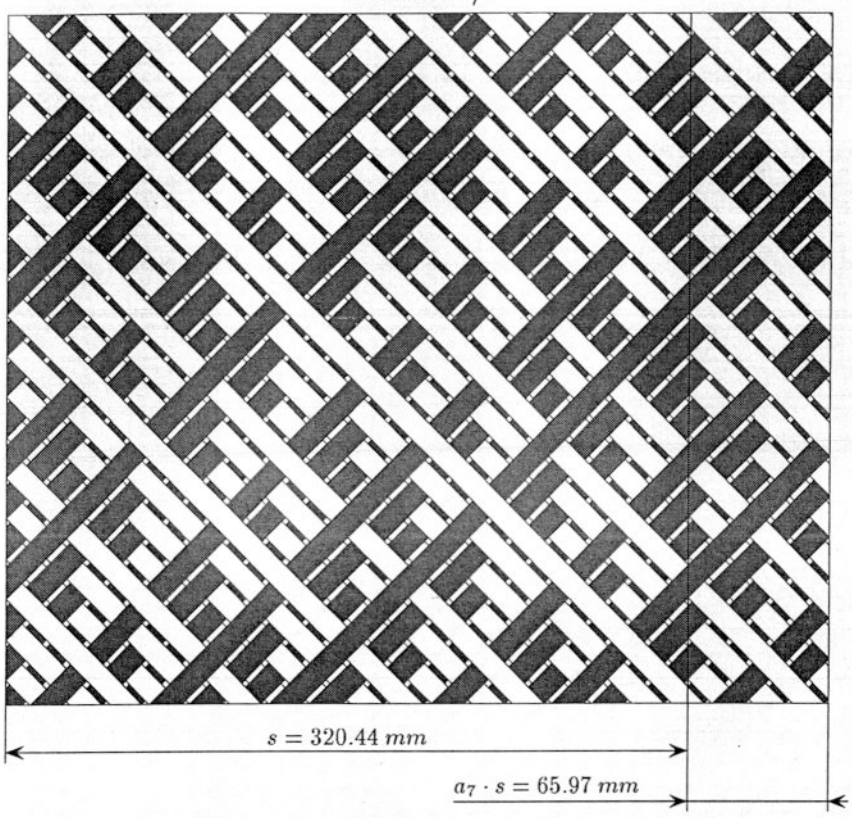
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 17/6



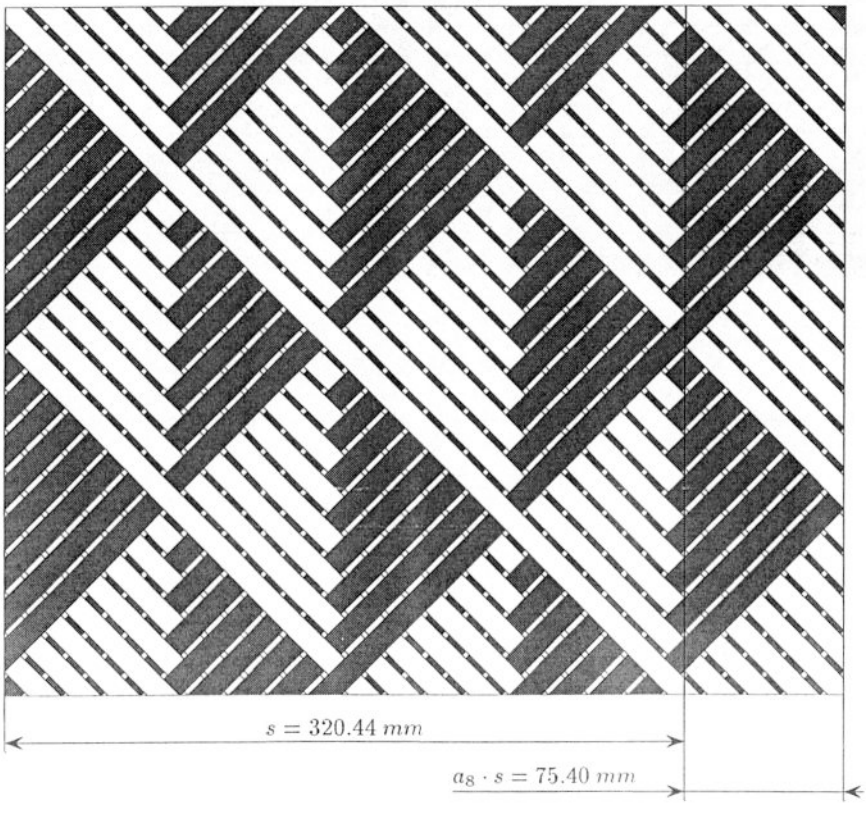
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 17/7



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

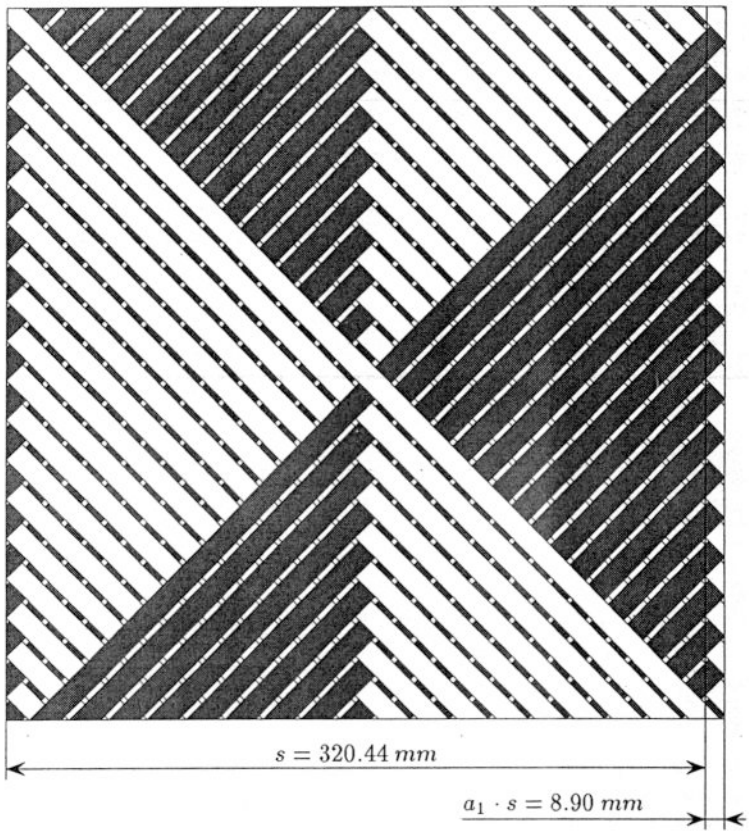
Tablica 17/8



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

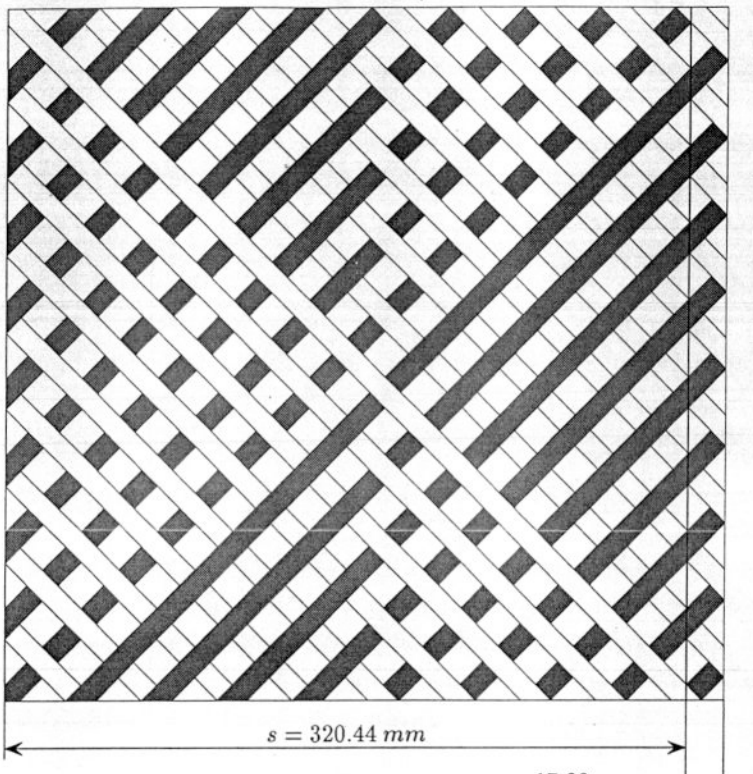
Liczba wiązek rowingu: 18																			$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow$																		$= Nr/(2 \cdot 18)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	1/36
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	2/36
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	3/36
4	0	5	0	1	0	6	0	2	0	7	0	3	0	8	0	4	0	9	4/36
5	11	4	15	8	1	12	5	16	9	2	13	6	17	10	3	14	7	18	5/36
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	6/36
7	13	8	3	16	11	6	1	14	9	4	17	12	7	2	15	10	5	18	7/36
8	0	7	0	5	0	3	0	1	0	8	0	6	0	4	0	2	0	9	8/36
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	9/36

Tablica 18/1



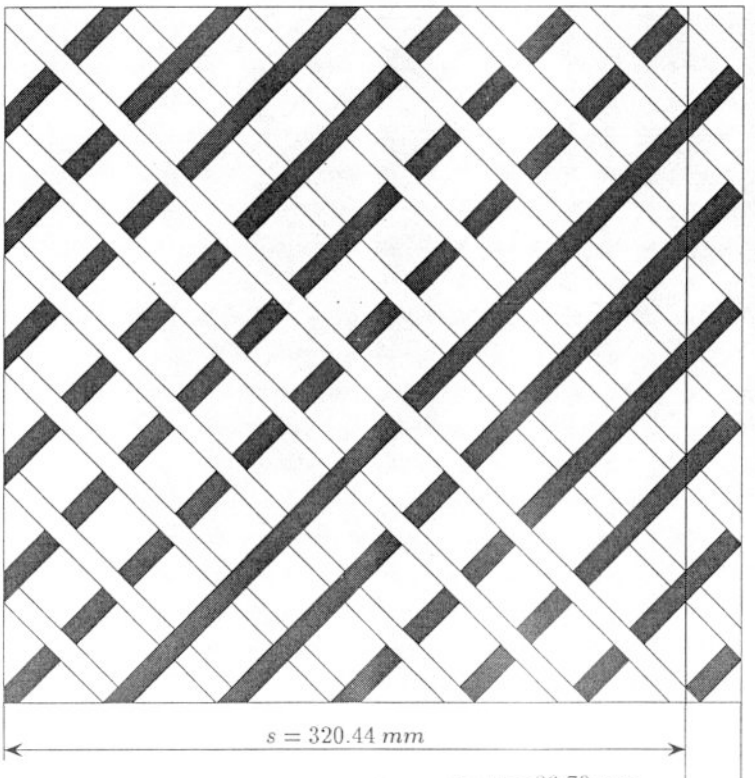
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 18/2



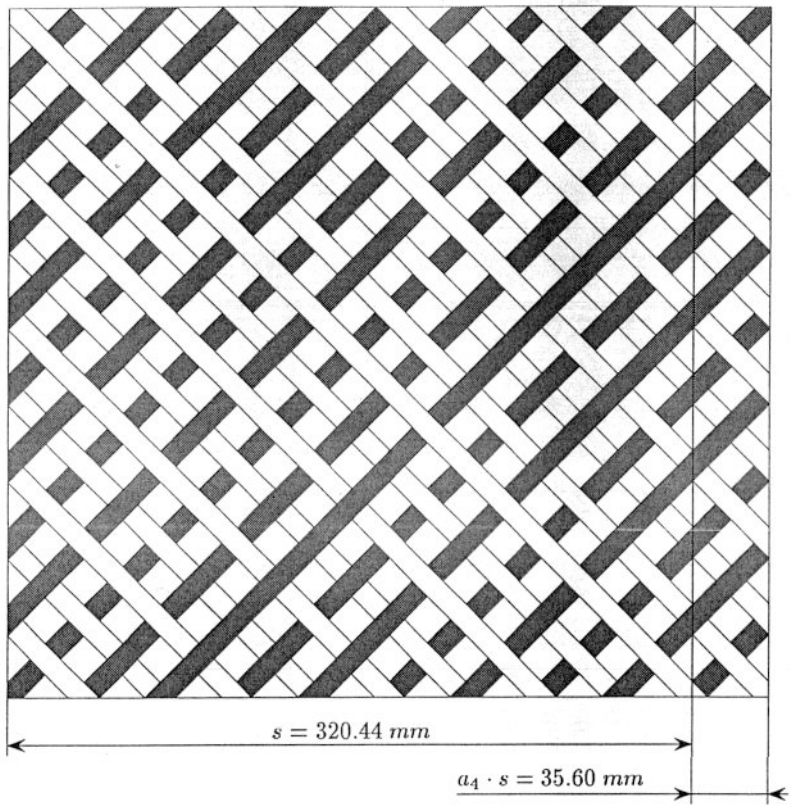
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 18/3



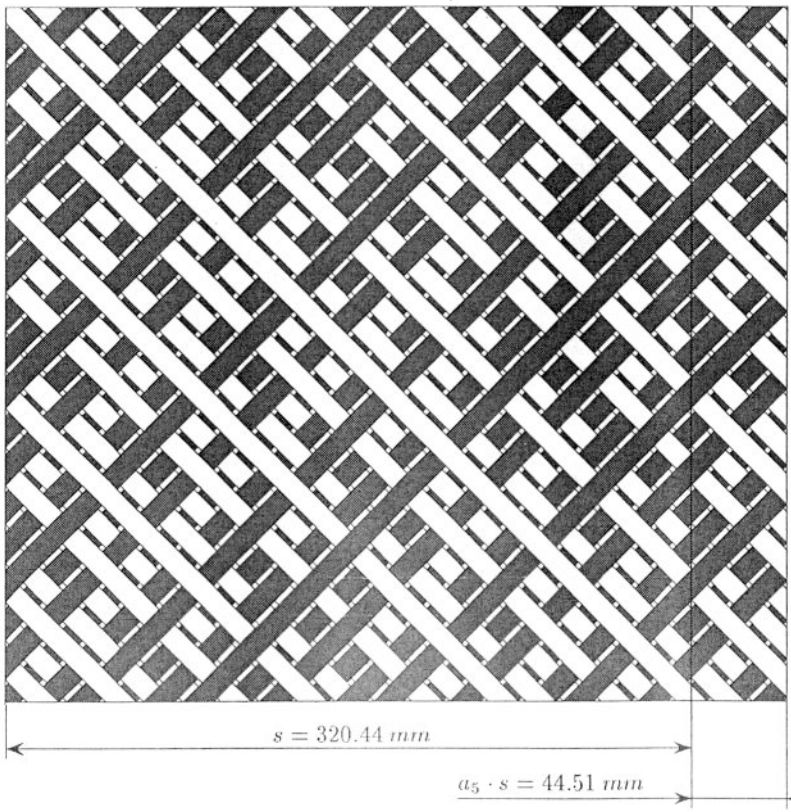
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 18/4



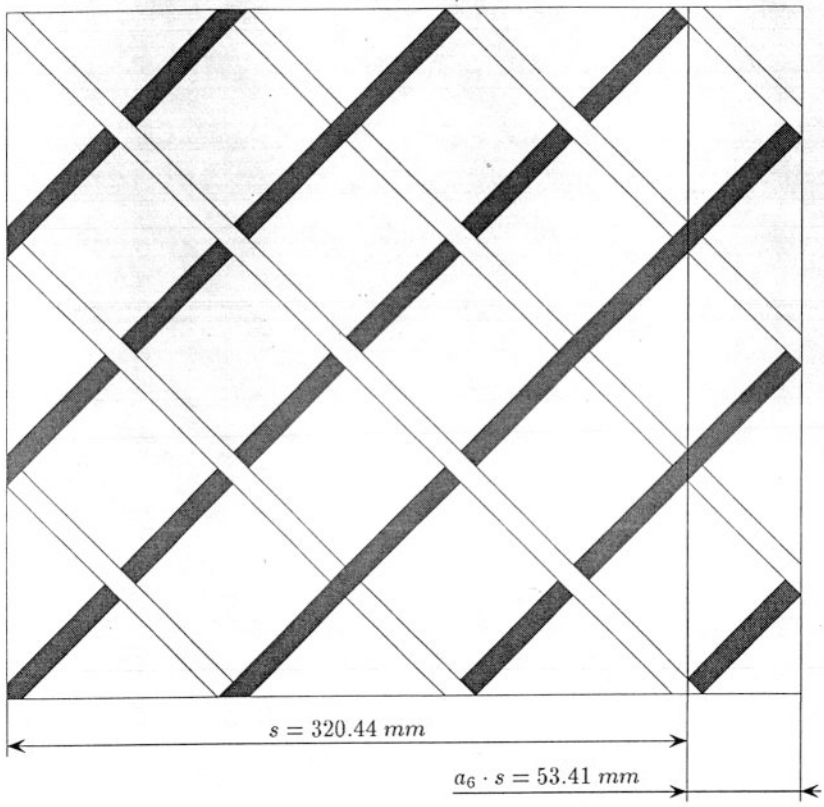
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 18/5



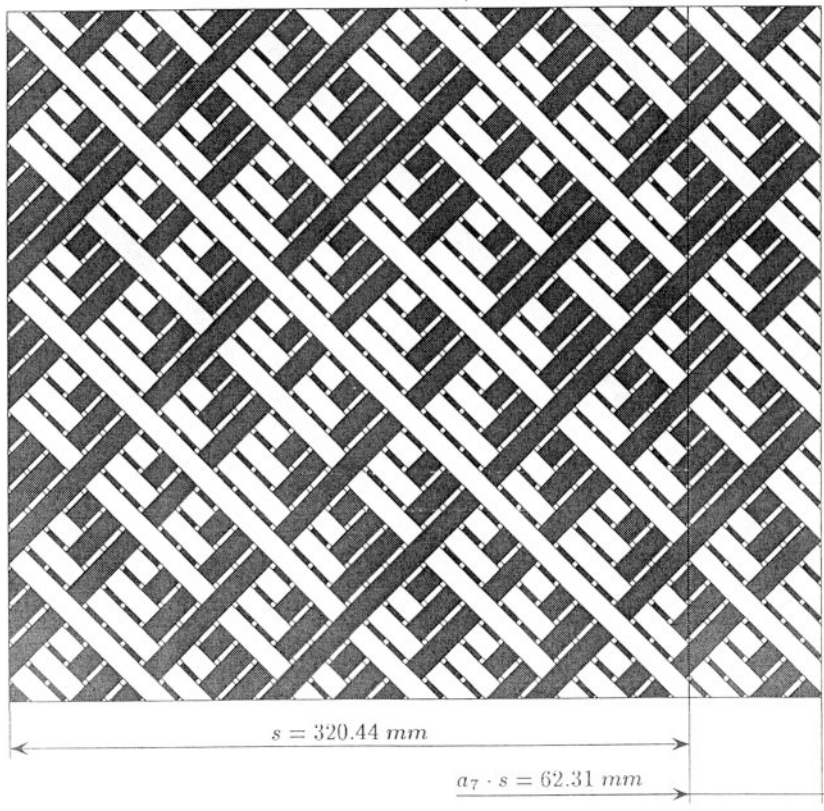
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 18/6



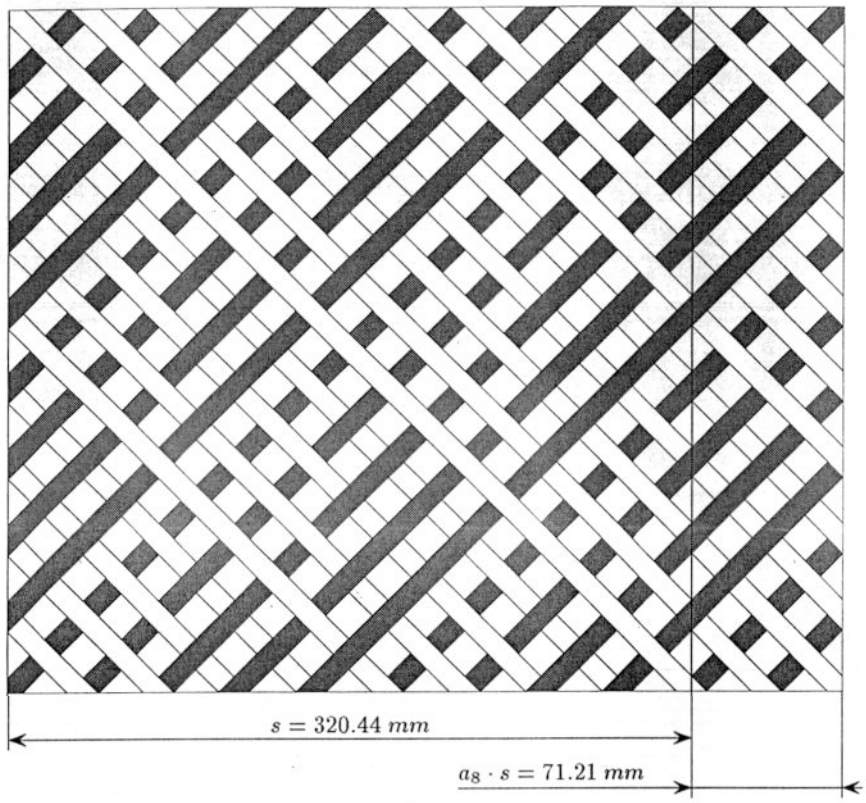
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 18/7



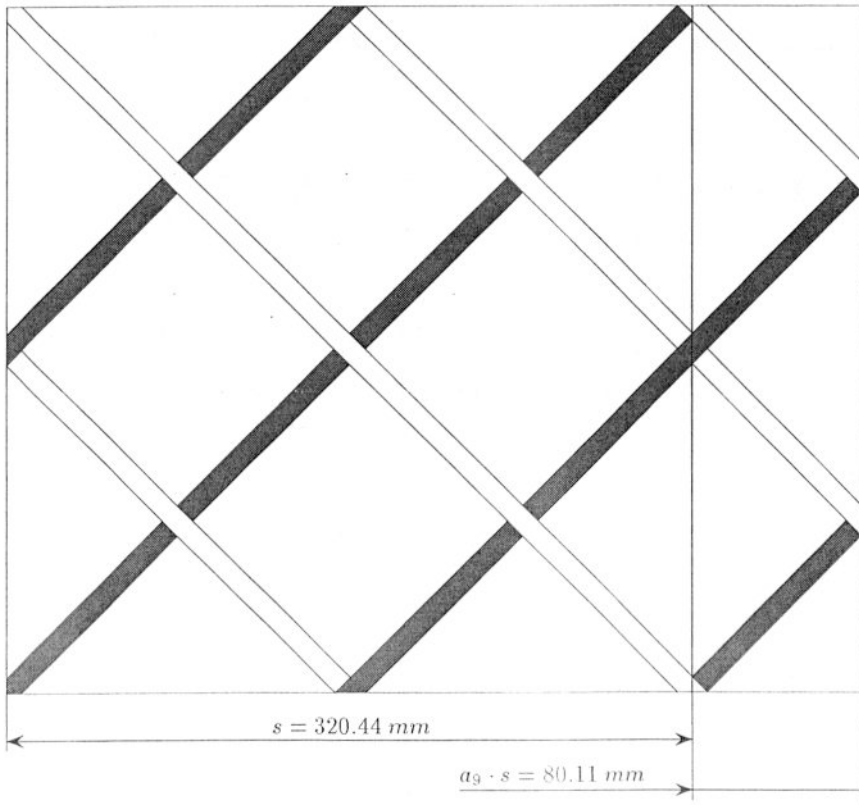
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 18/8



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

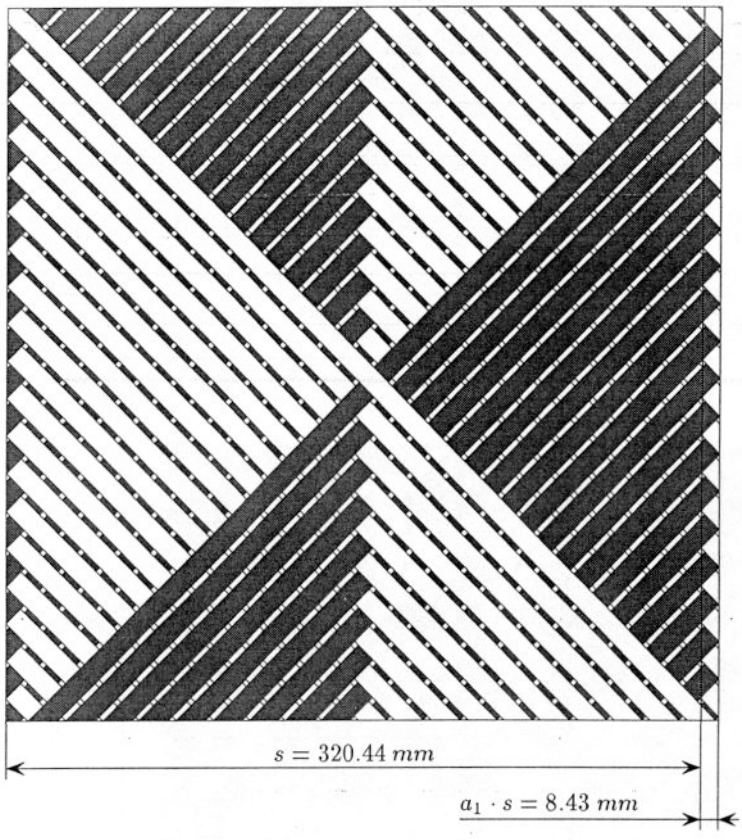
Tablica 18/9



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

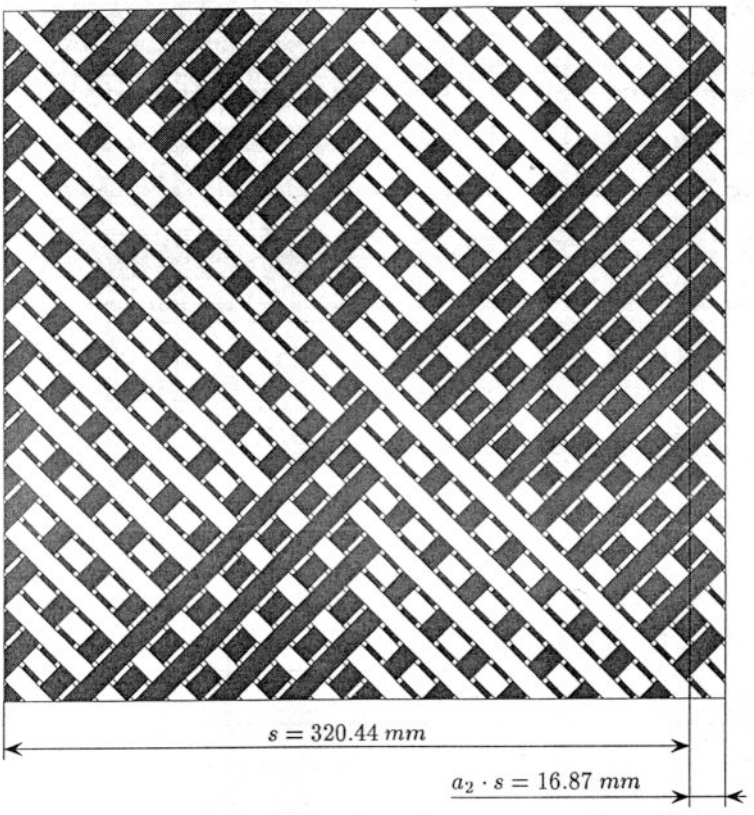
Liczba wiązek rowingu: 19																				$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																			$= Nr/(2 \cdot 19)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1/38
2	10	1	11	2	12	3	13	4	14	5	15	6	16	7	17	8	18	9	19	2/38
3	13	7	1	14	8	2	15	9	3	16	10	4	17	11	5	18	12	6	19	3/38
4	5	10	15	1	6	11	16	2	7	12	17	3	8	13	18	4	9	14	19	4/38
5	4	8	12	16	1	5	9	13	17	2	6	10	14	18	3	7	11	15	19	5/38
6	16	13	10	7	4	1	17	14	11	8	5	2	18	15	12	9	6	3	19	6/38
7	11	3	14	6	17	9	1	12	4	15	7	18	10	2	13	5	16	8	19	7/38
8	12	5	17	10	3	15	8	1	13	6	18	11	4	16	9	2	14	7	19	8/38
9	17	15	13	11	9	7	5	3	1	18	16	14	12	10	8	6	4	2	19	9/38

Tablica 19/1



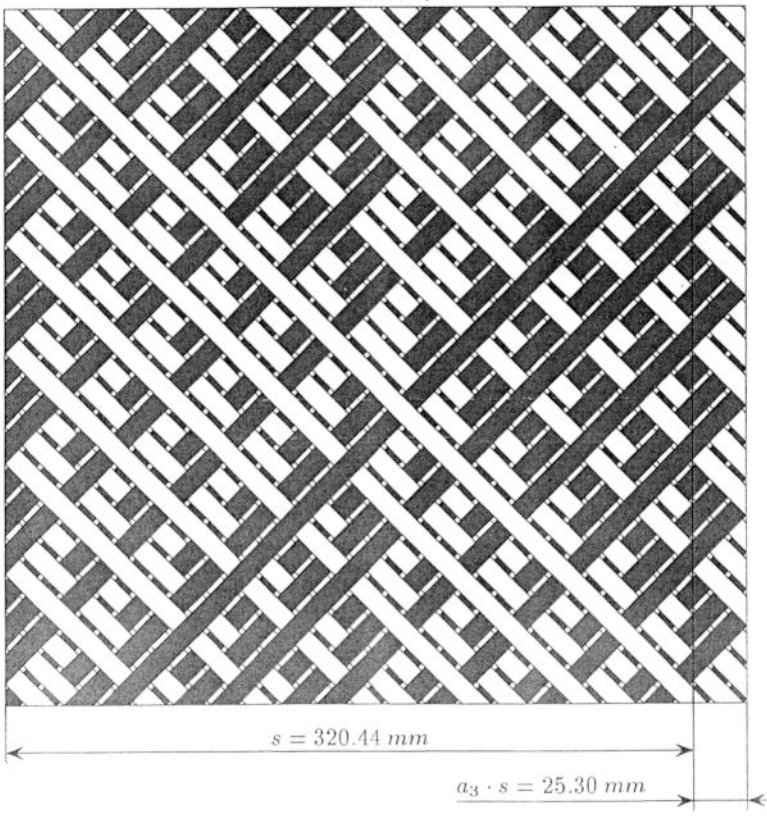
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 19/2



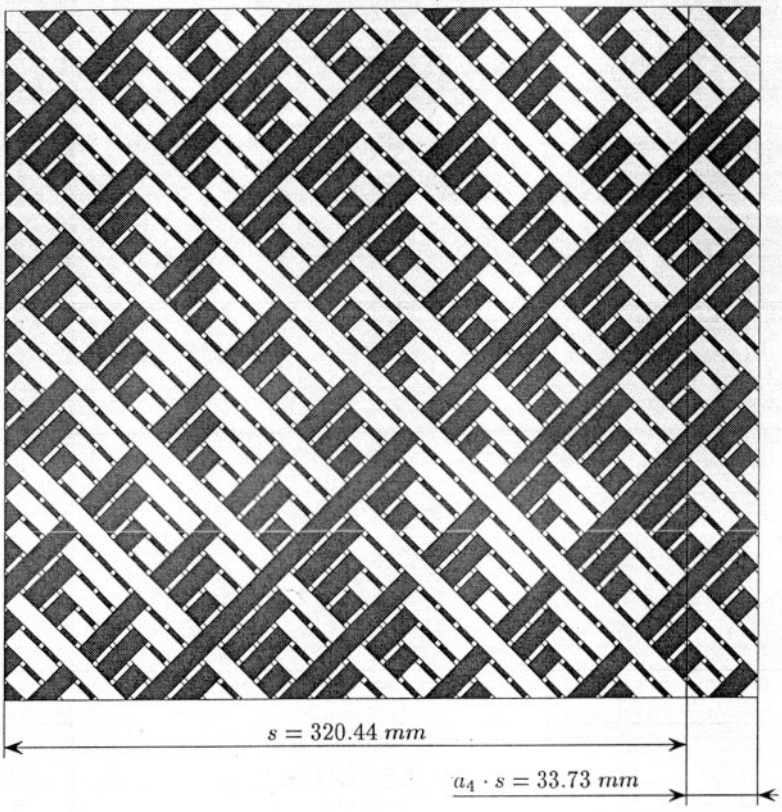
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 19/3



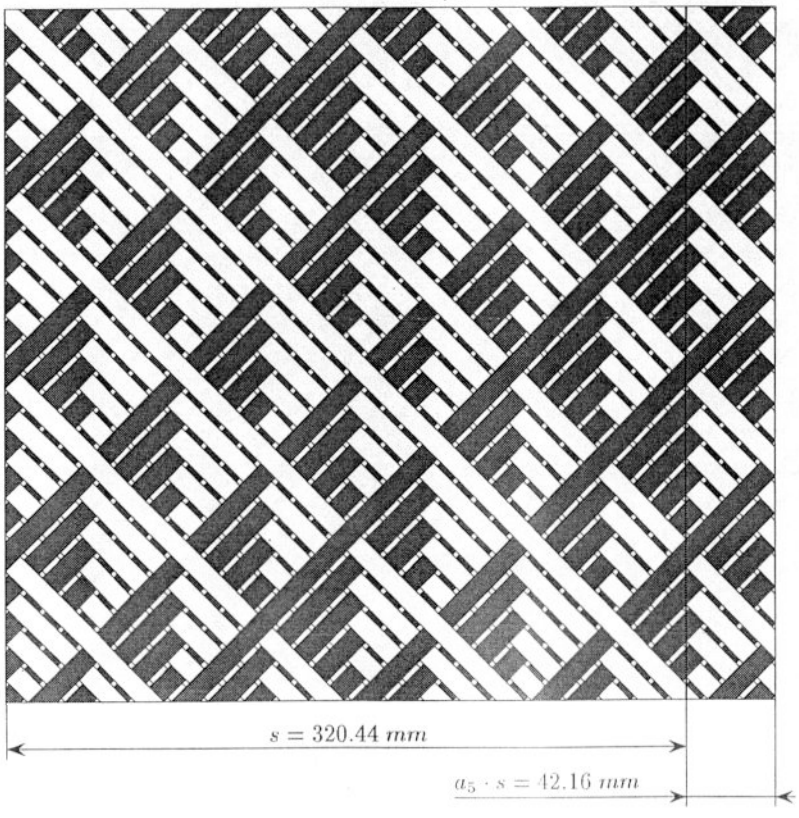
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 19/4



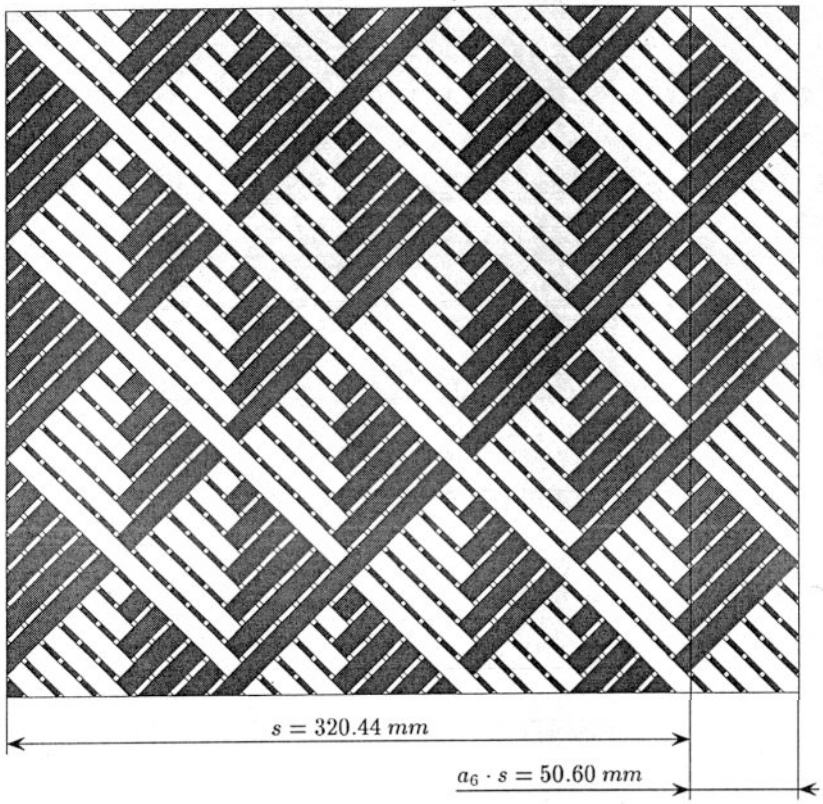
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 19/5



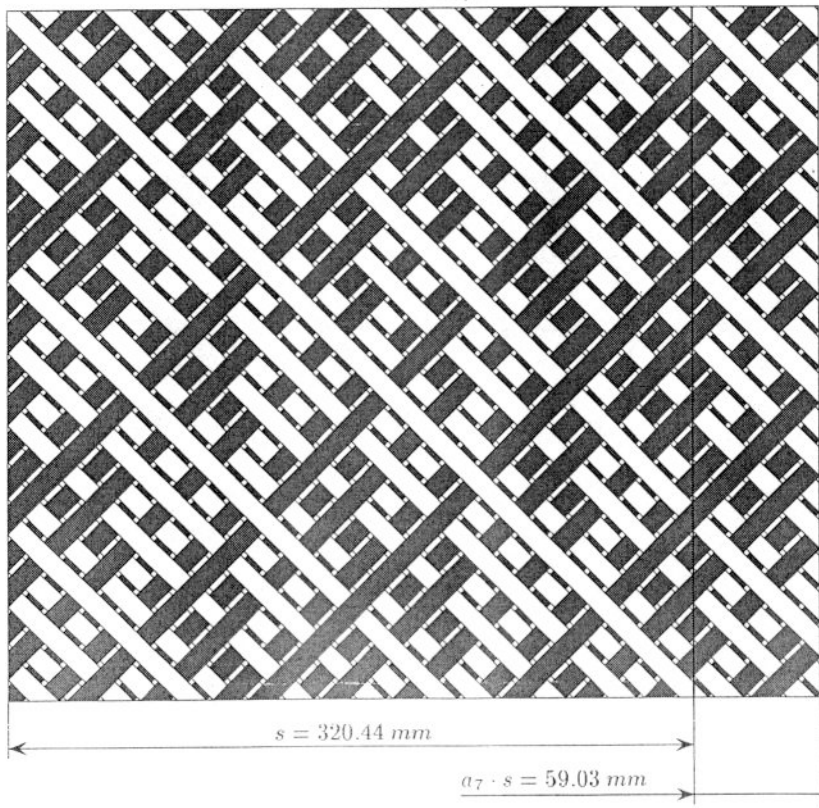
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 19/6



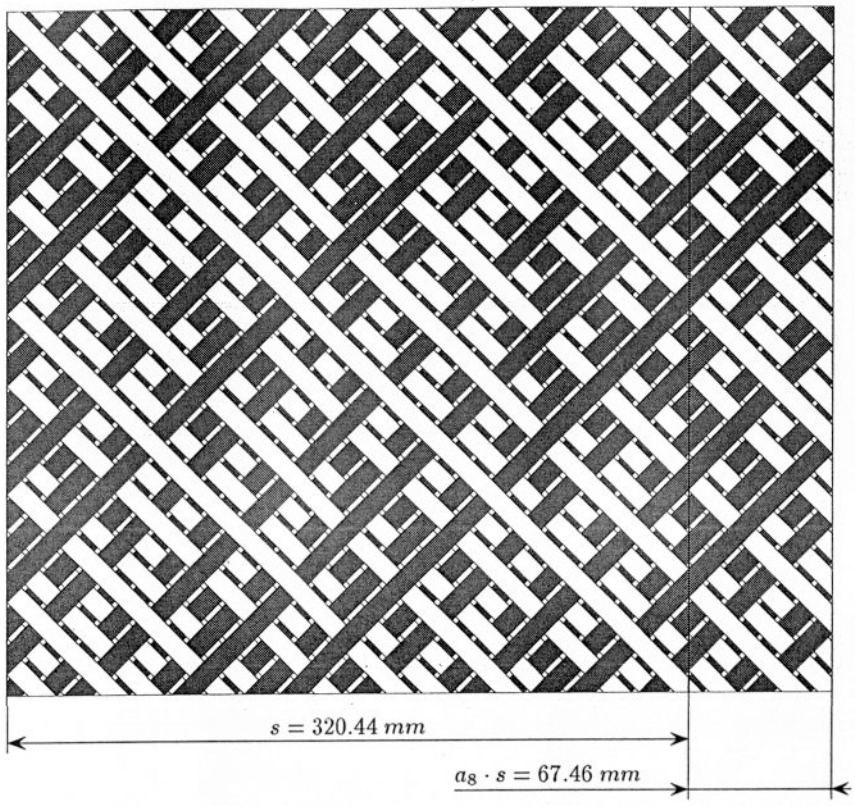
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 19/7



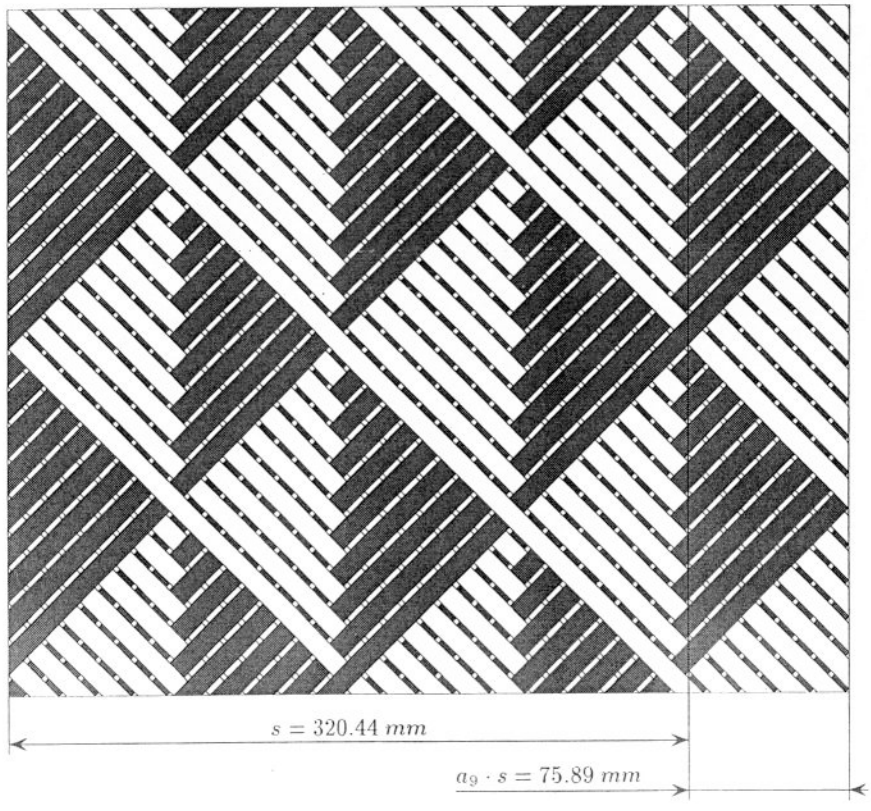
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 19/8



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

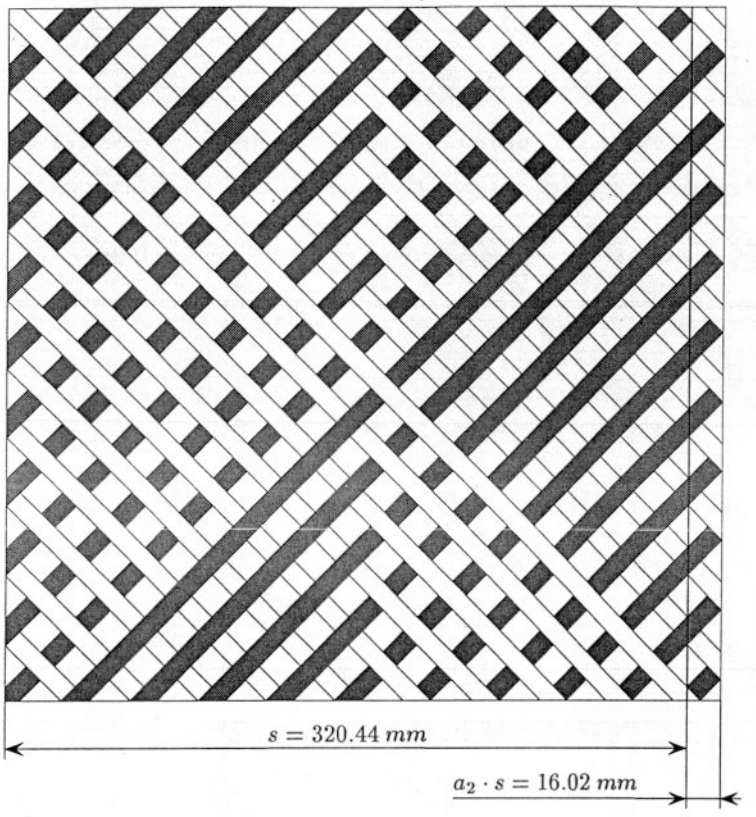
Tablica 19/9



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

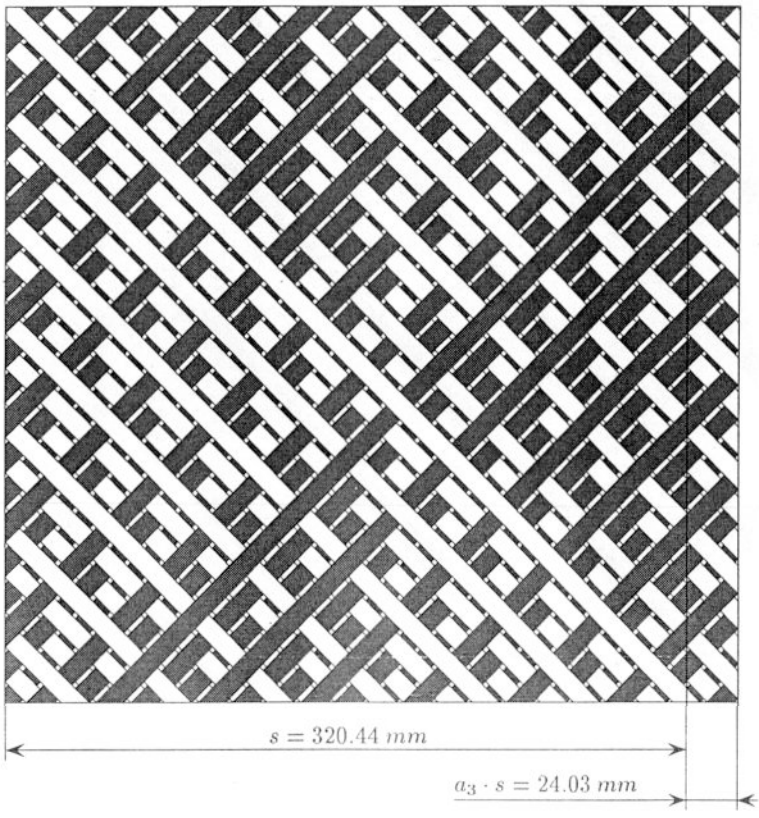
Liczba wiązek rowingu: 20																					$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow\!\!\!

Tablica 20/2



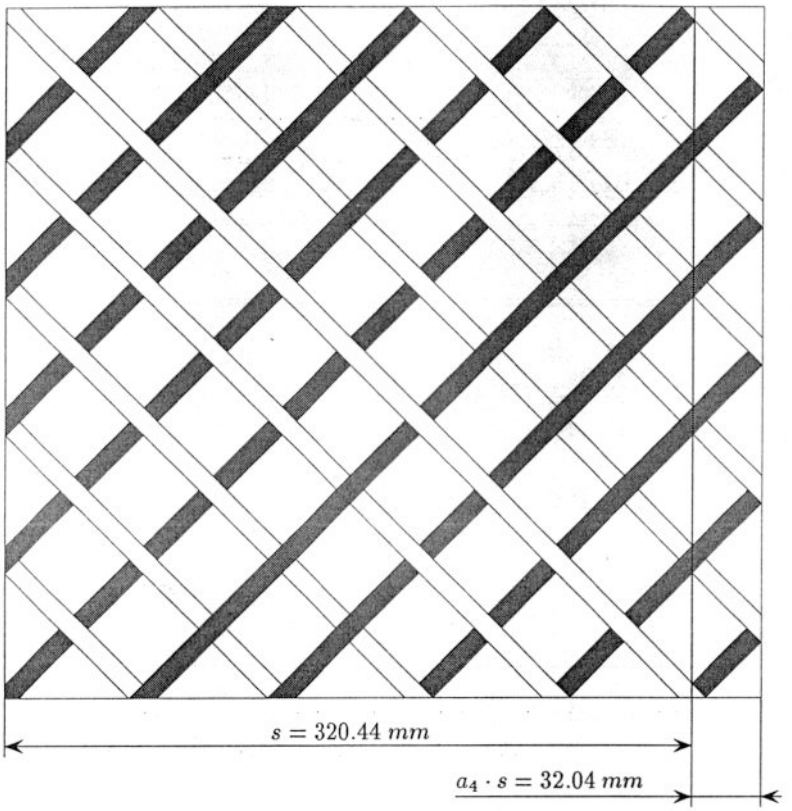
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 20/3



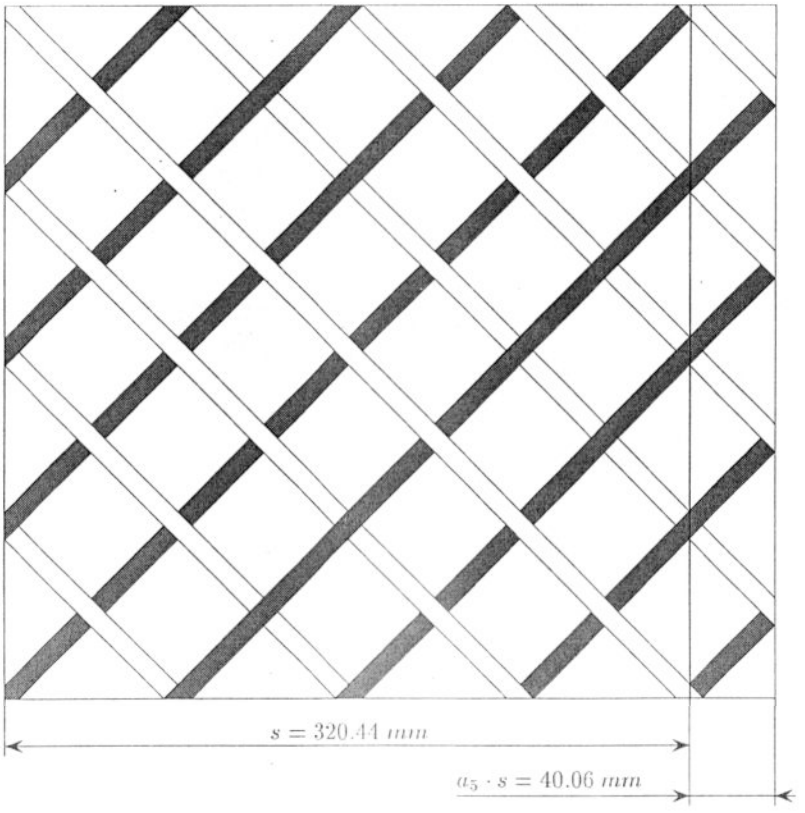
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 20/4



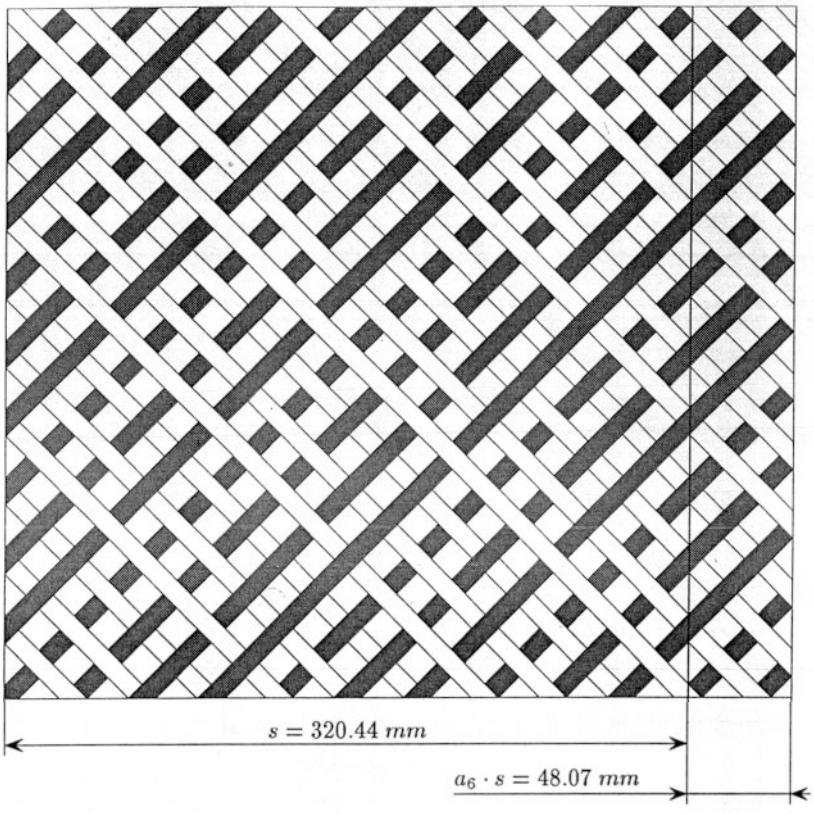
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 20/5



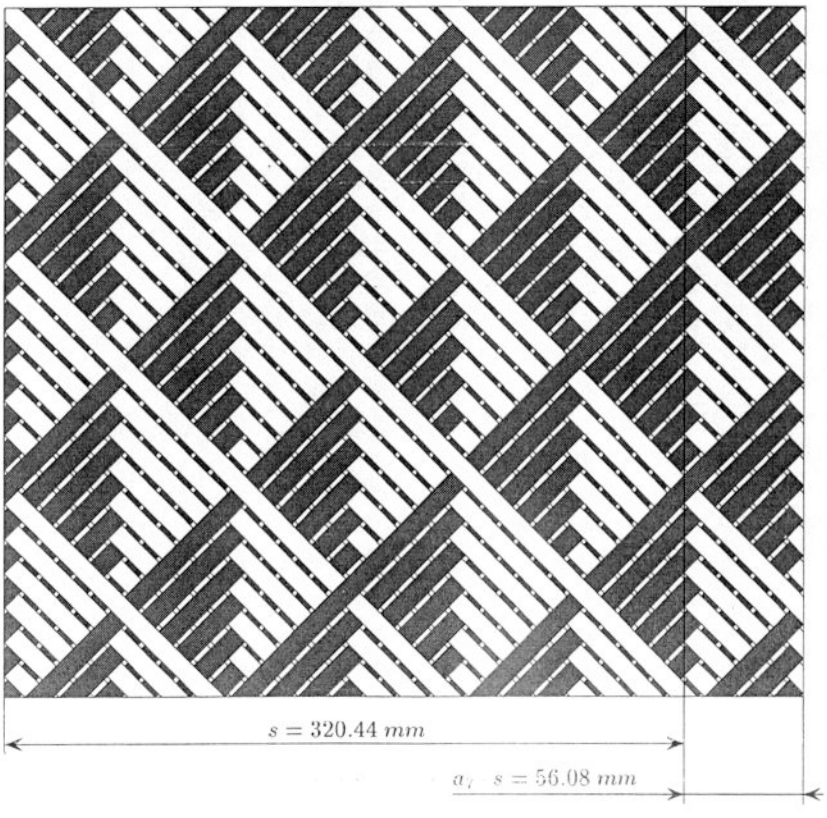
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 20/6



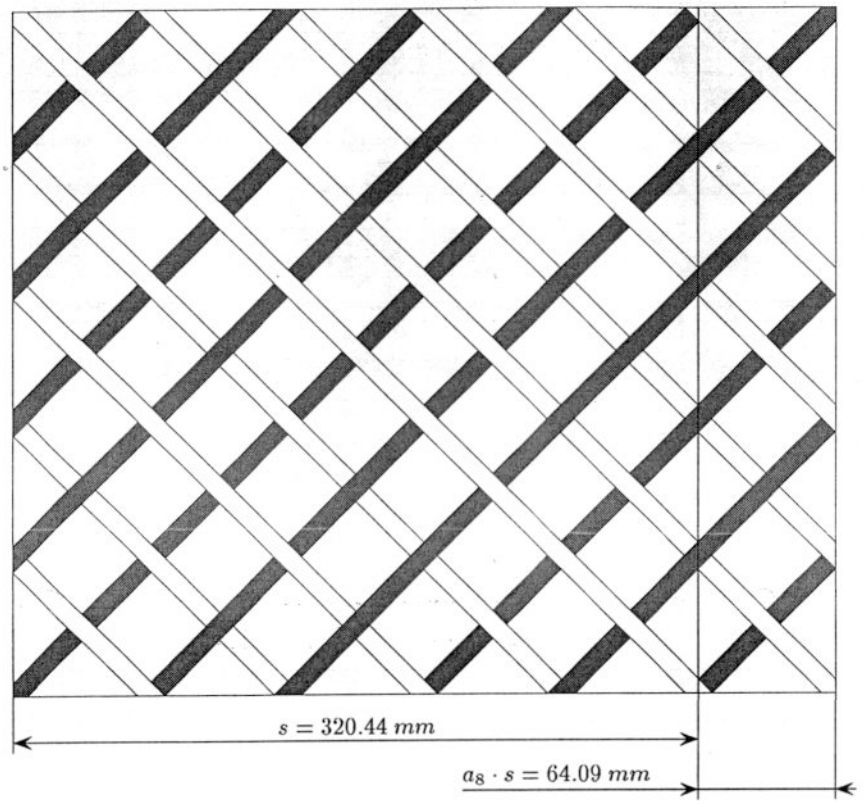
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 20/7



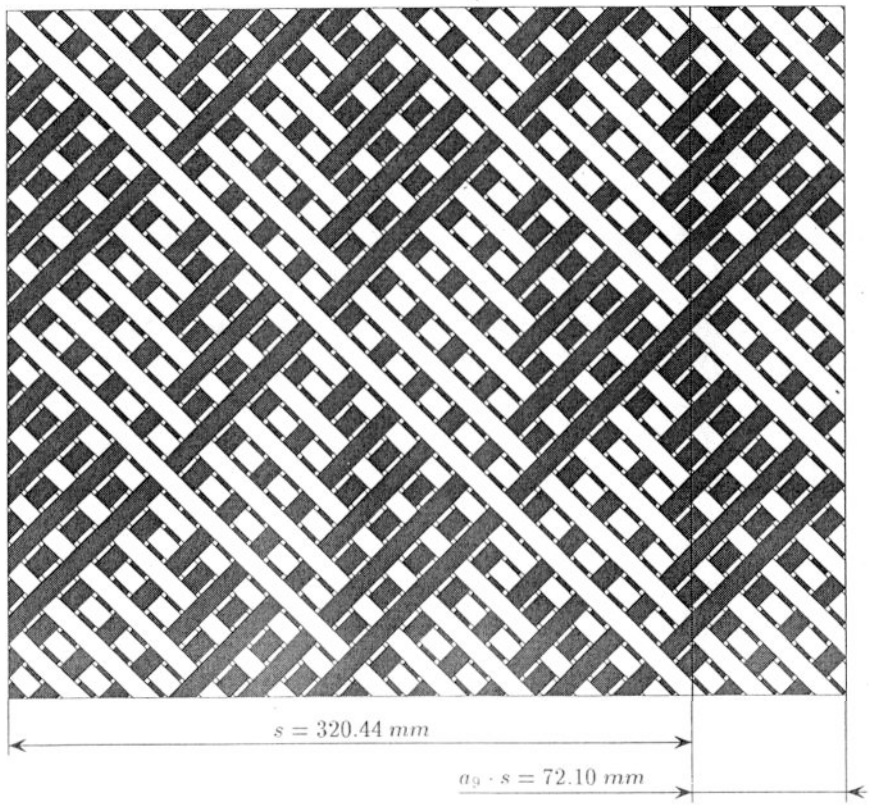
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 20/8



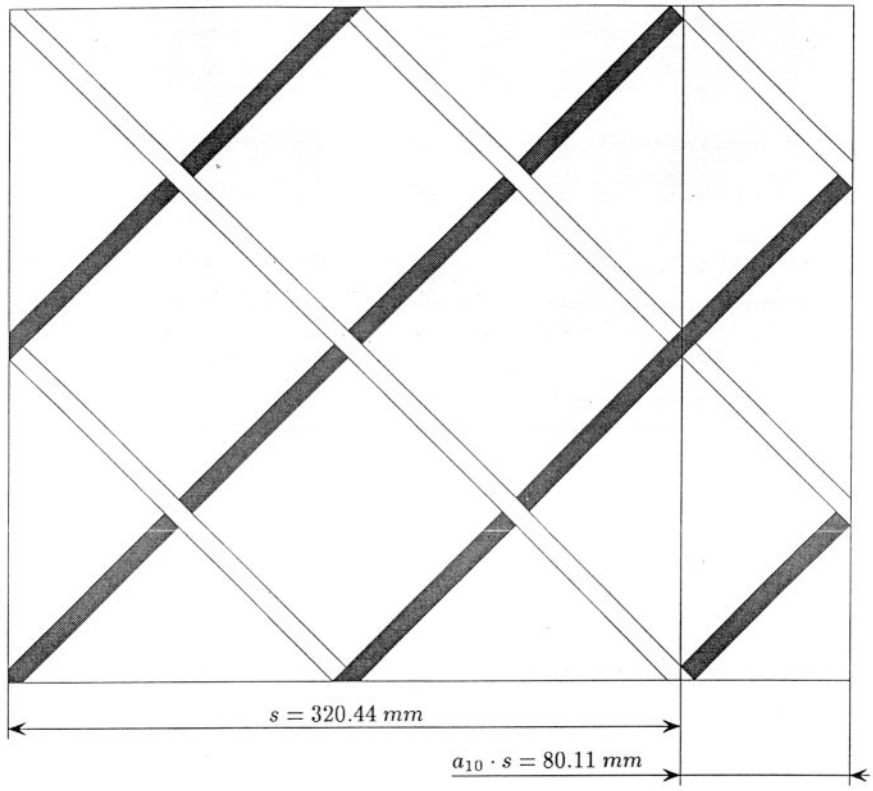
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 20/9



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

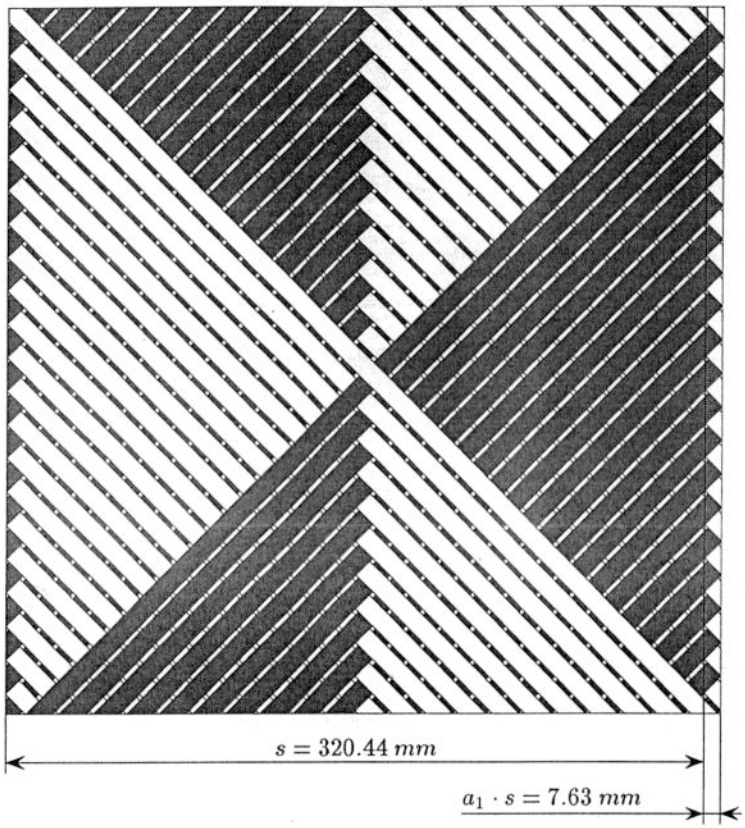
Tablica 20/10



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

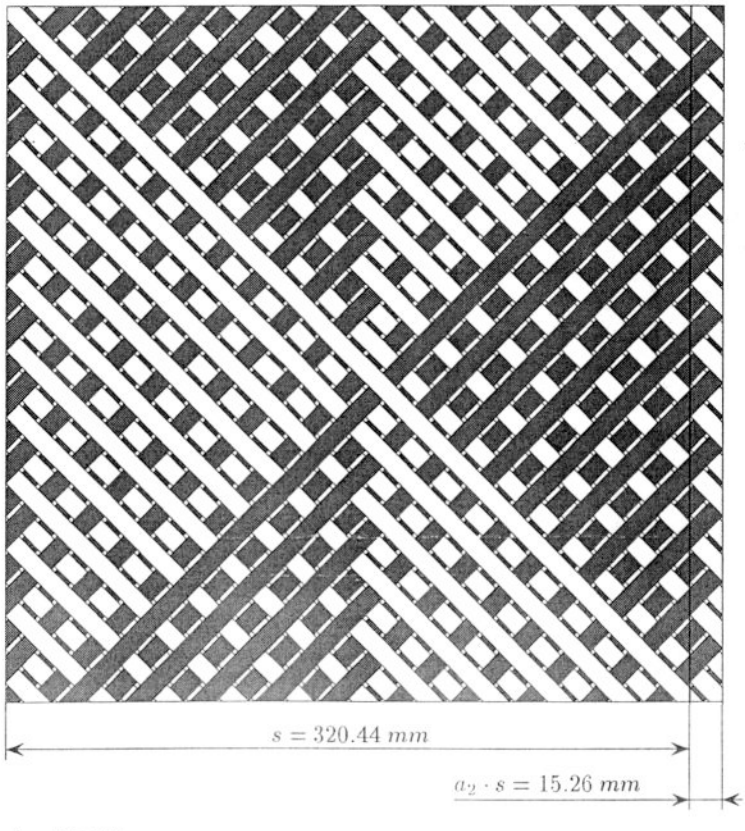
Liczba wiązek rowingu: 21																						$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																					$= Nr/(2 \cdot 21)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	1/42
2	11	1	12	2	13	3	14	4	15	5	16	6	17	7	18	8	19	9	20	10	21	2/42
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	3/42
4	16	11	6	1	17	12	7	2	18	13	8	3	19	14	9	4	20	15	10	5	21	4/42
5	17	13	9	5	1	18	14	10	6	2	19	15	11	7	3	20	16	12	8	4	21	5/42
6	0	0	4	0	0	1	0	0	5	0	0	2	0	0	6	0	0	3	0	0	7	6/42
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	7/42
8	8	16	3	11	19	6	14	1	9	17	4	12	20	7	15	2	10	18	5	13	21	8/42
9	0	0	5	0	0	3	0	0	1	0	0	6	0	0	4	0	0	2	0	0	7	9/42
10	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	21	10/42

Tablica 21/1



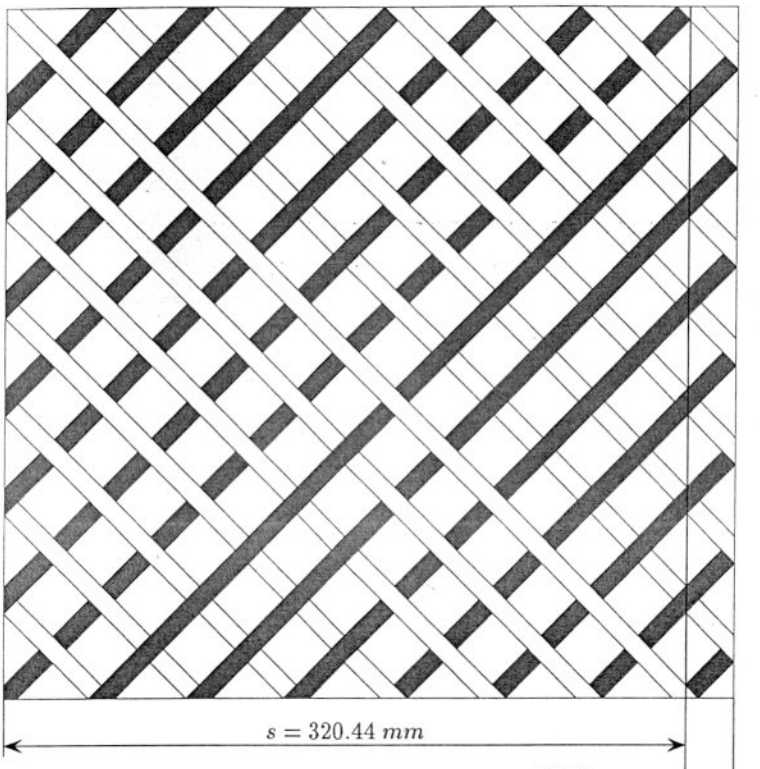
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 21/2



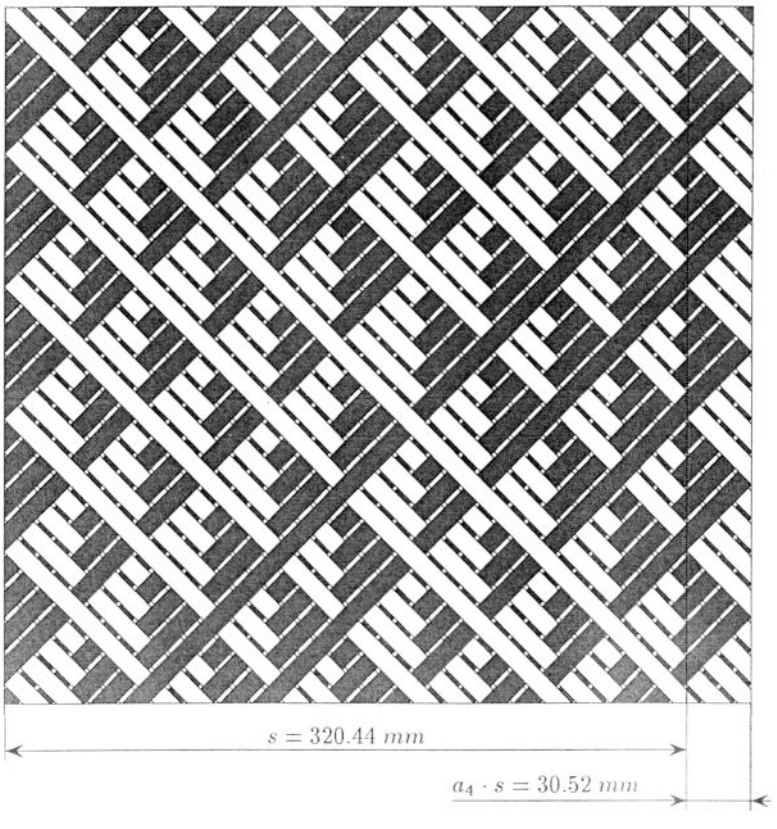
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 21/3



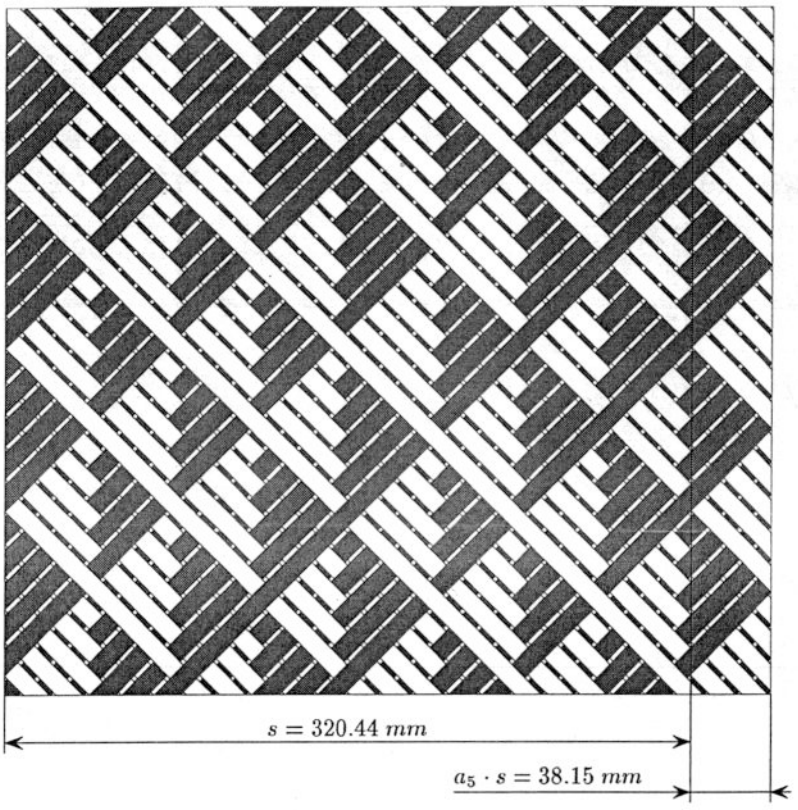
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 21/4



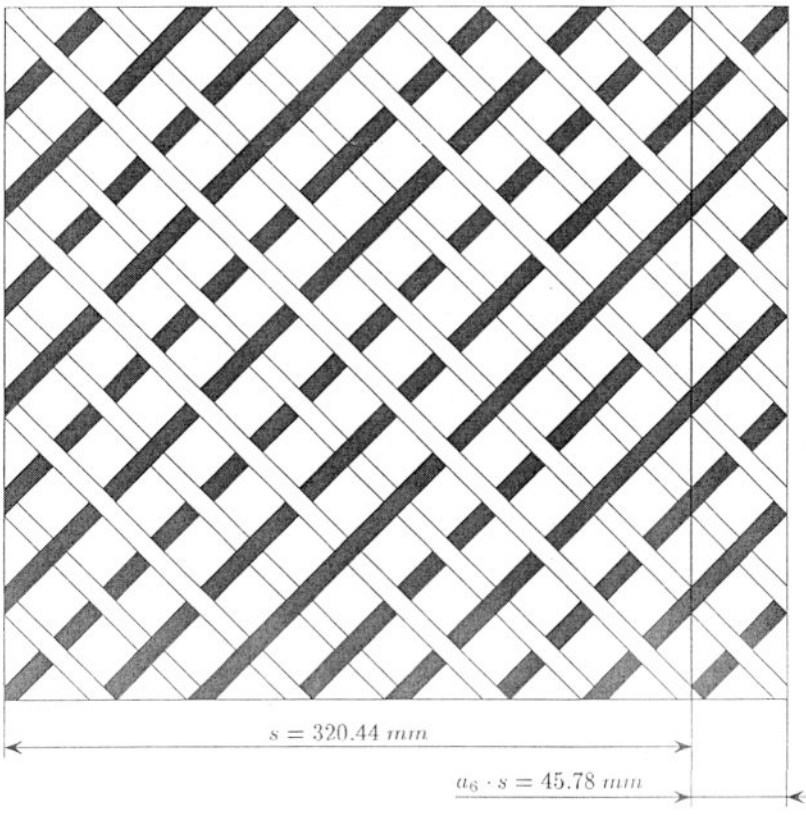
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 21/5



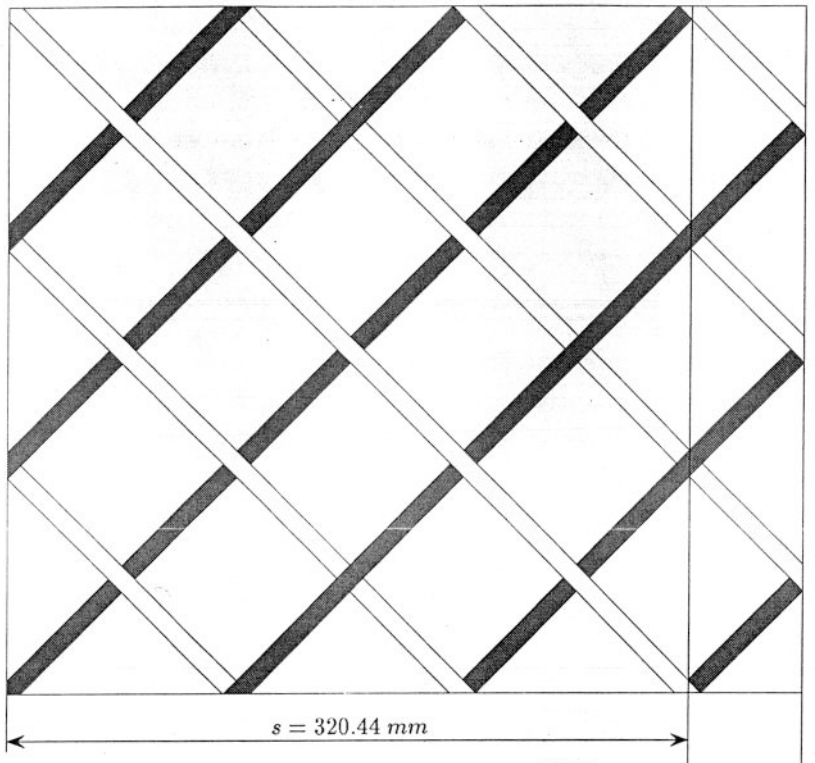
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 21/6



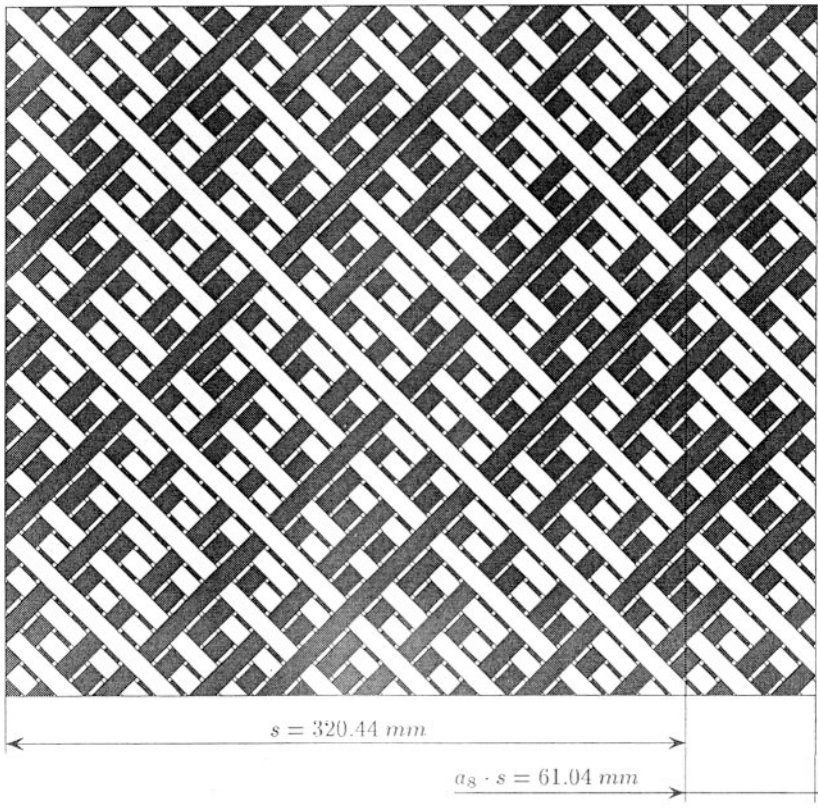
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 21/7



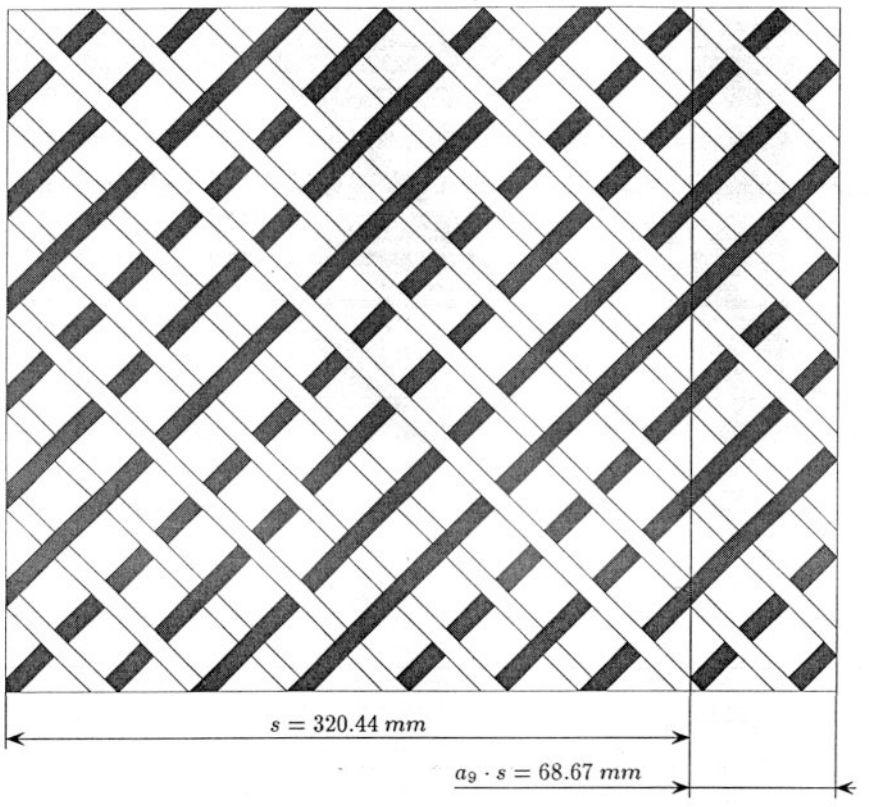
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 21/8



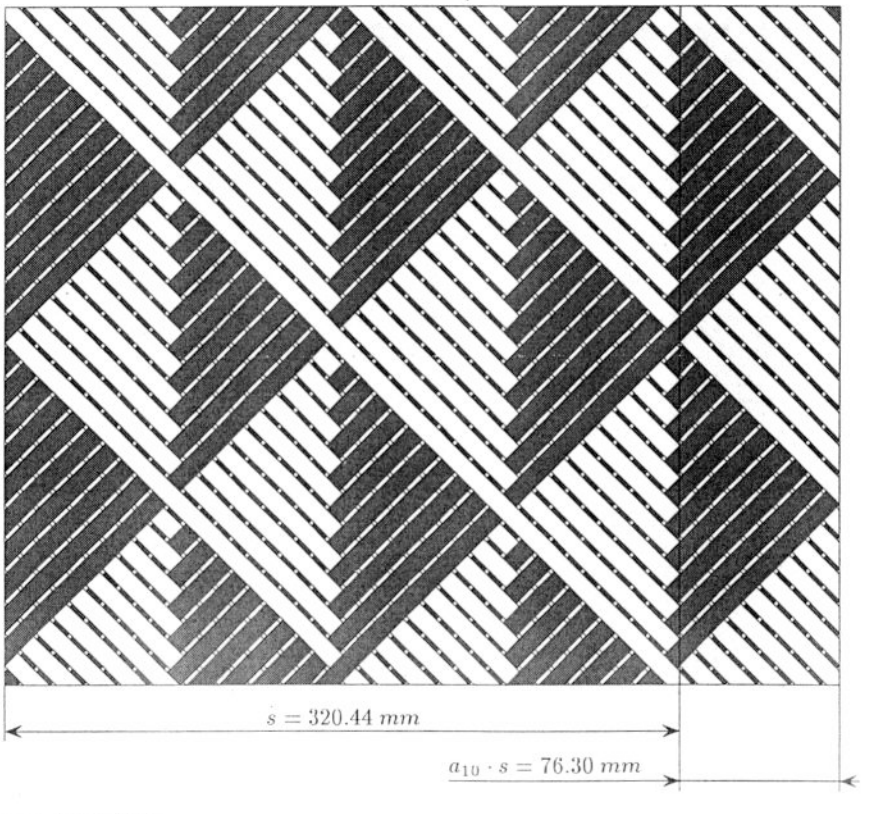
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 21/9



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

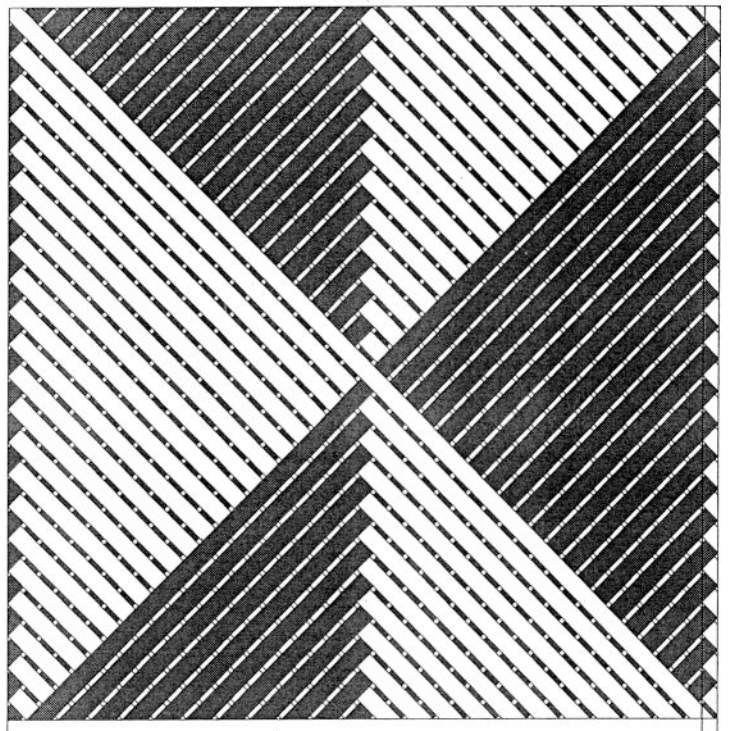
Tablica 21/10



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

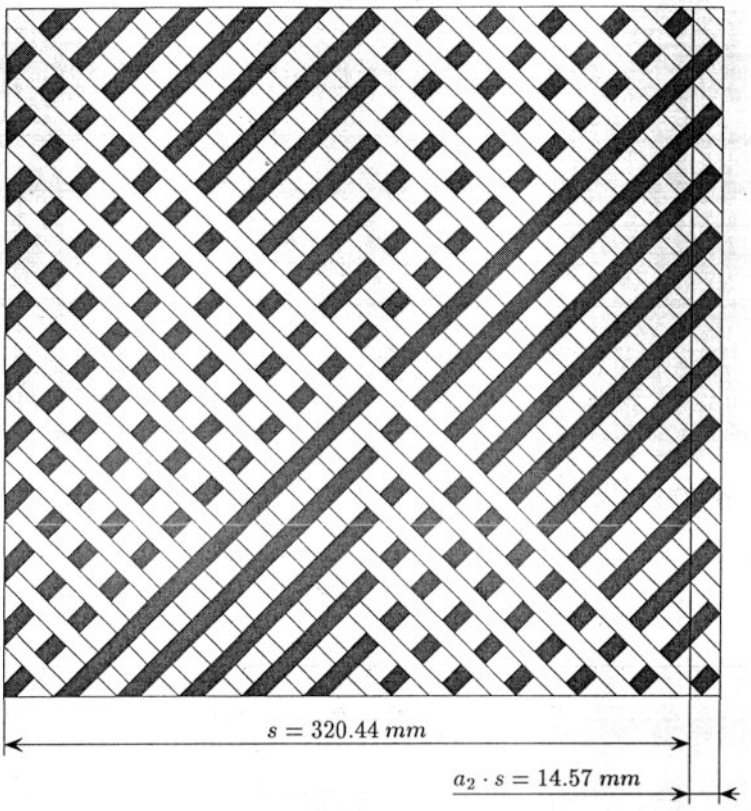
Liczba wiązek rowingu: 22																							$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$																						$= Nr/(2 \cdot 22)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	1/44
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	2/44
3	15	8	1	16	9	2	17	10	3	18	11	4	19	12	5	20	13	6	21	14	7	22	3/44
4	0	6	0	1	0	7	0	2	0	8	0	3	0	9	0	4	0	10	0	5	0	11	4/44
5	9	18	5	14	1	10	19	6	15	2	11	20	7	16	3	12	21	8	17	4	13	22	5/44
6	0	4	0	8	0	1	0	5	0	9	0	2	0	6	0	10	0	3	0	7	0	11	6/44
7	19	16	13	10	7	4	1	20	17	14	11	8	5	2	21	18	15	12	9	6	3	22	7/44
8	0	3	0	6	0	9	0	1	0	4	0	7	0	10	0	2	0	5	0	8	0	11	8/44
9	5	10	15	20	3	8	13	18	1	6	11	16	21	4	9	14	19	2	7	12	17	22	9/44
10	0	9	0	7	0	5	0	3	0	1	0	10	0	8	0	6	0	4	0	2	0	11	10/44
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	11/44

Tablica 22/1



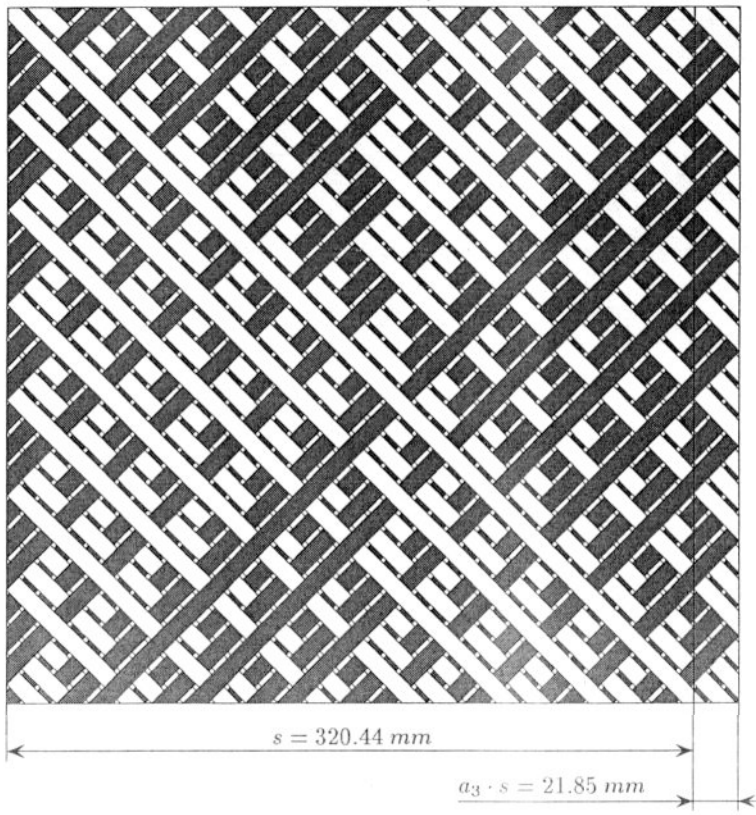
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 22/2



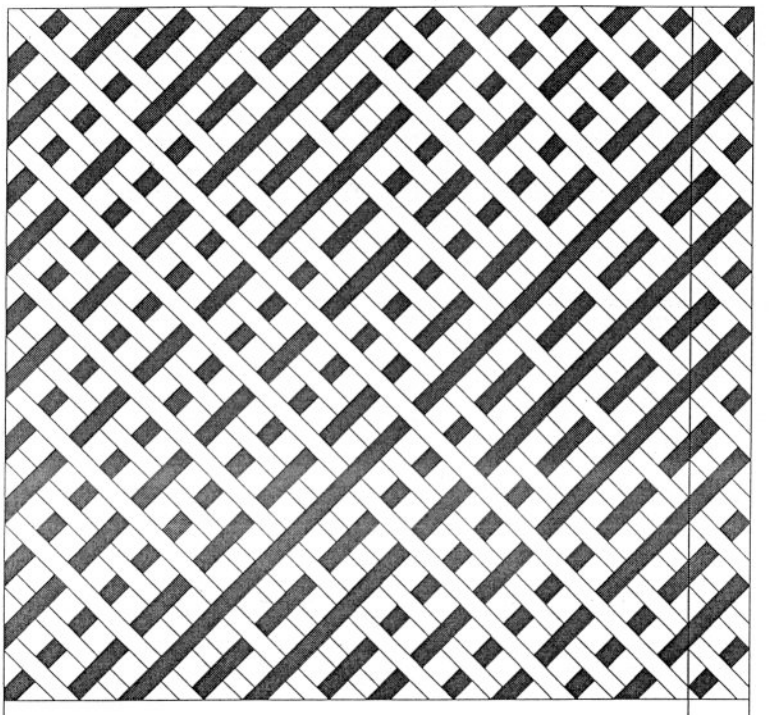
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 22/3



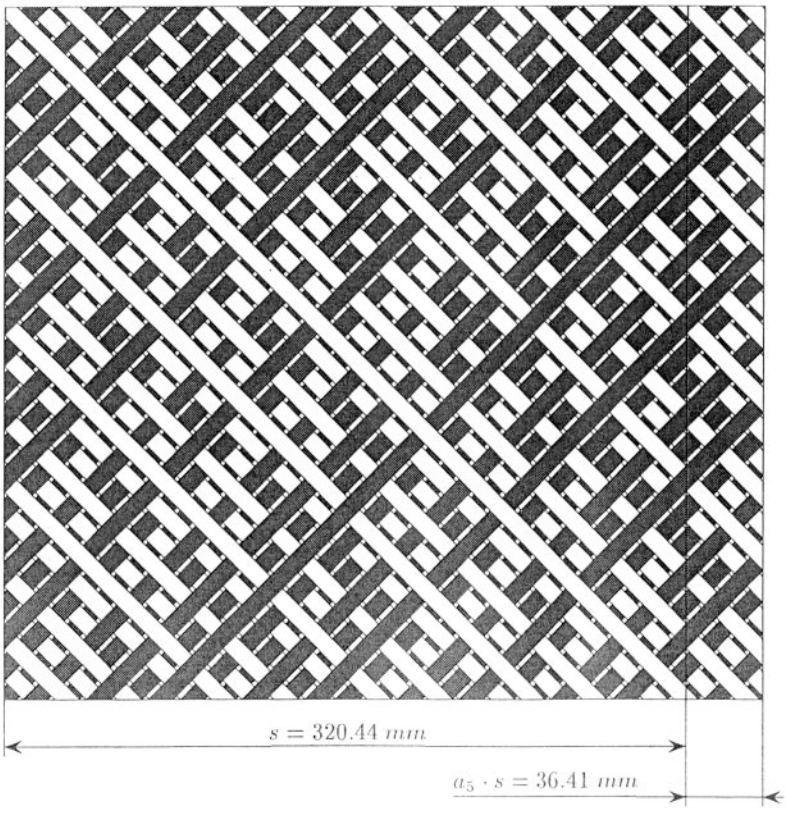
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 22/4



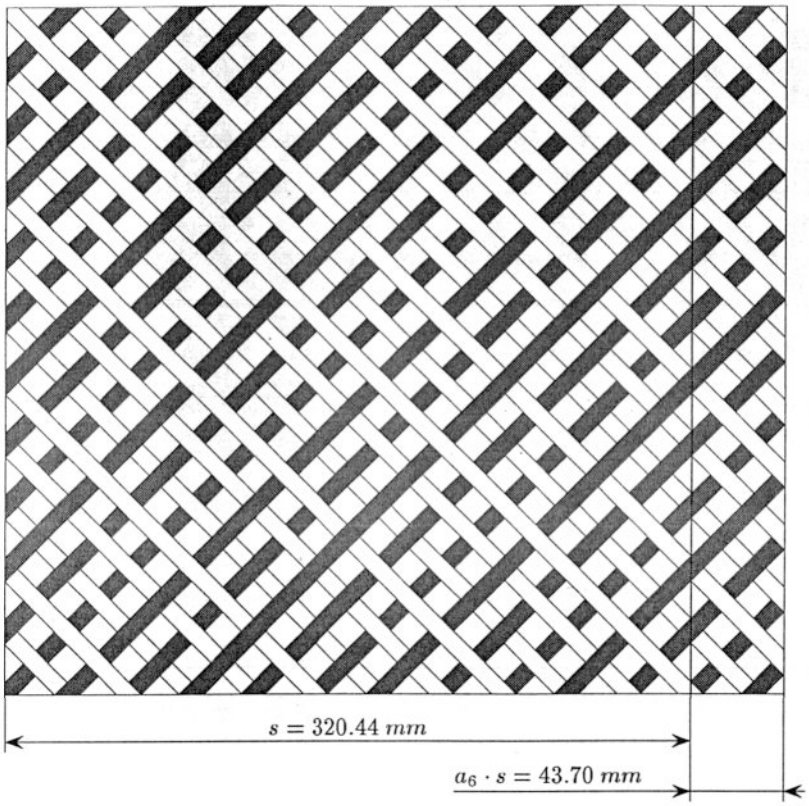
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 22/5



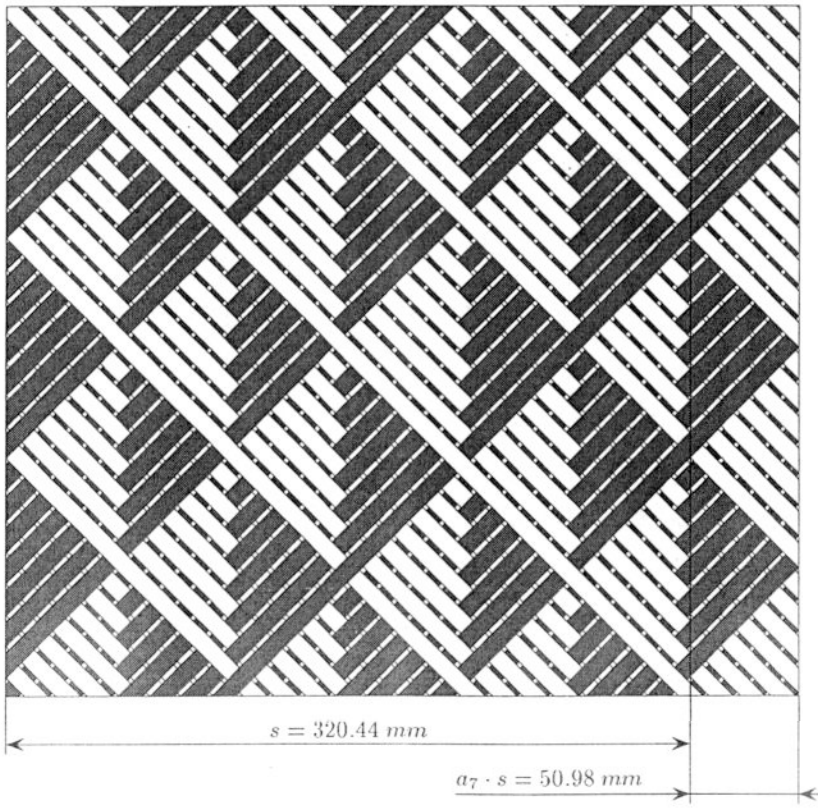
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 22/6



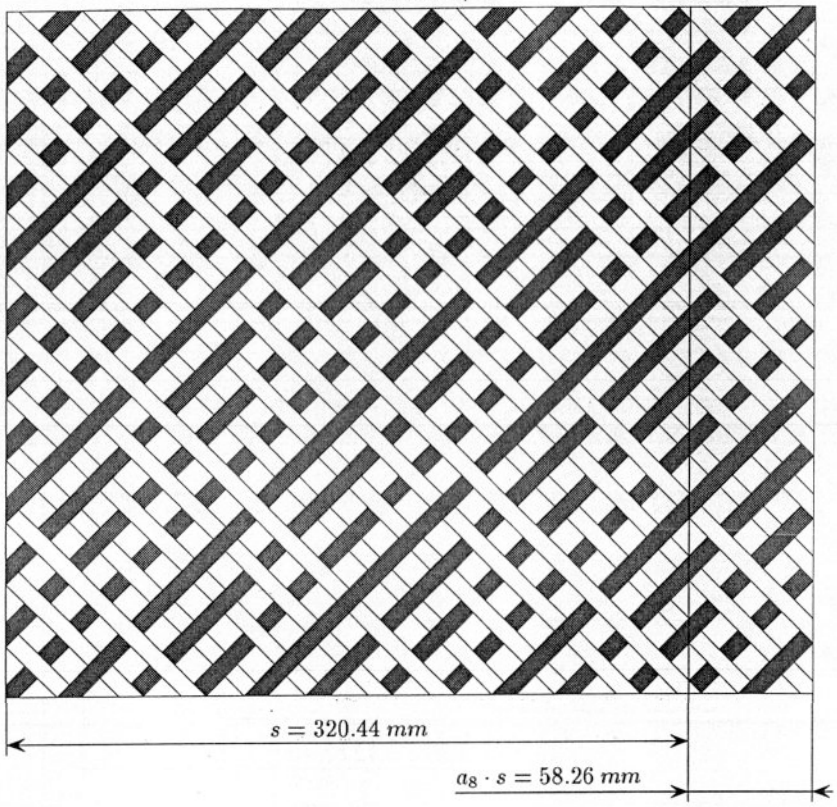
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 22/7



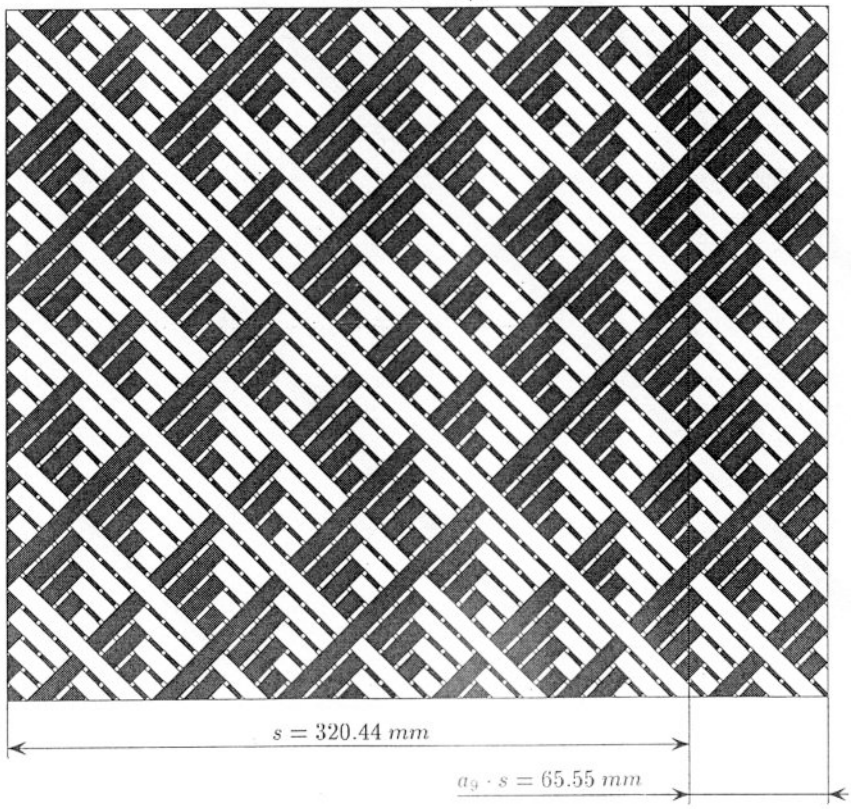
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 22/8



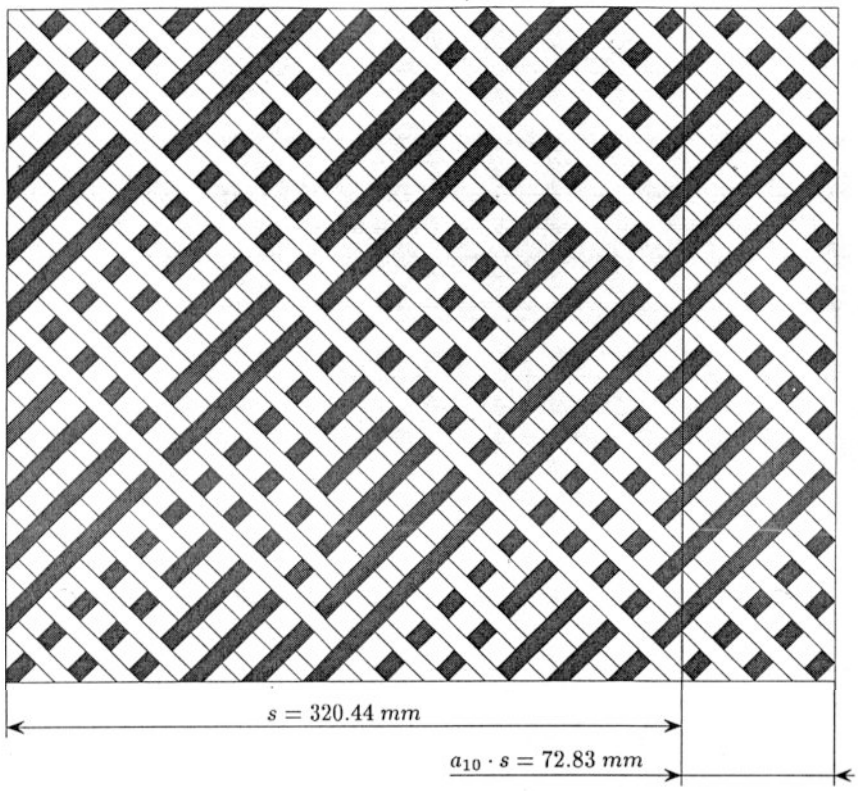
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 22/9



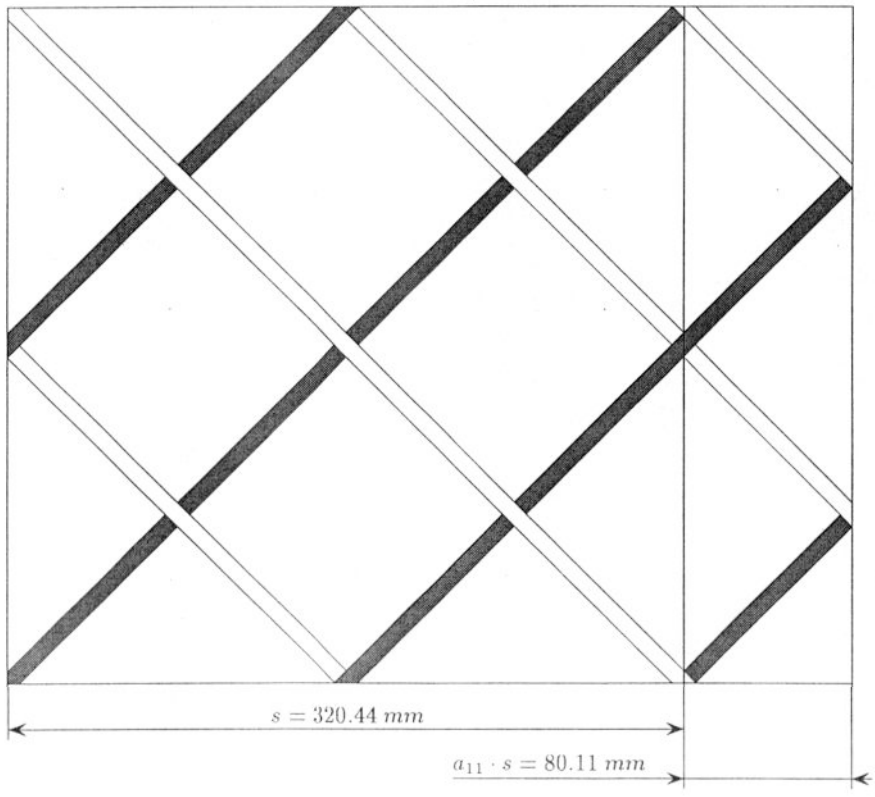
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 22/10



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

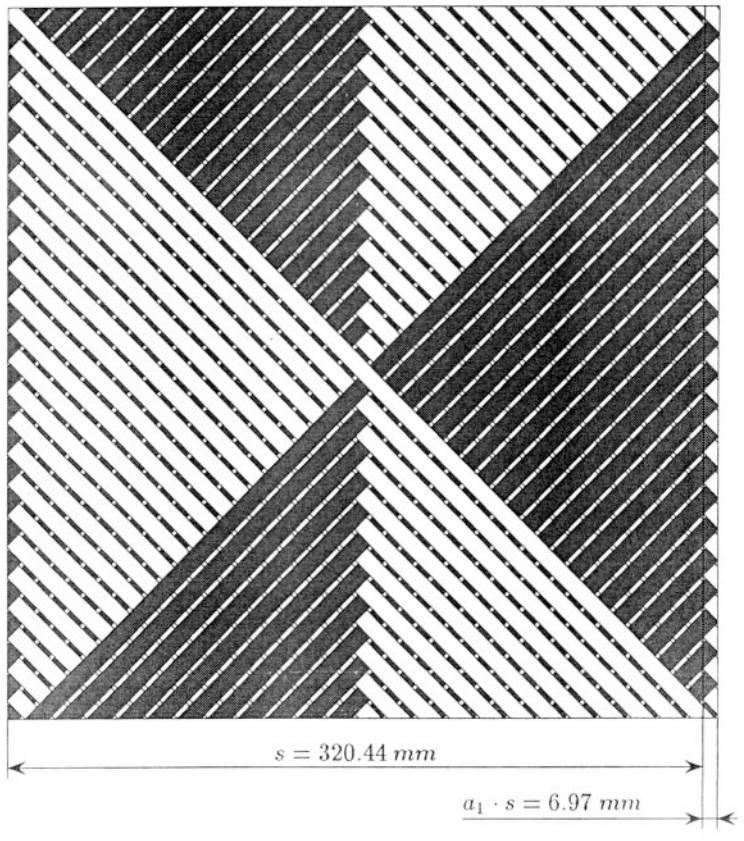
Tablica 22/11



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

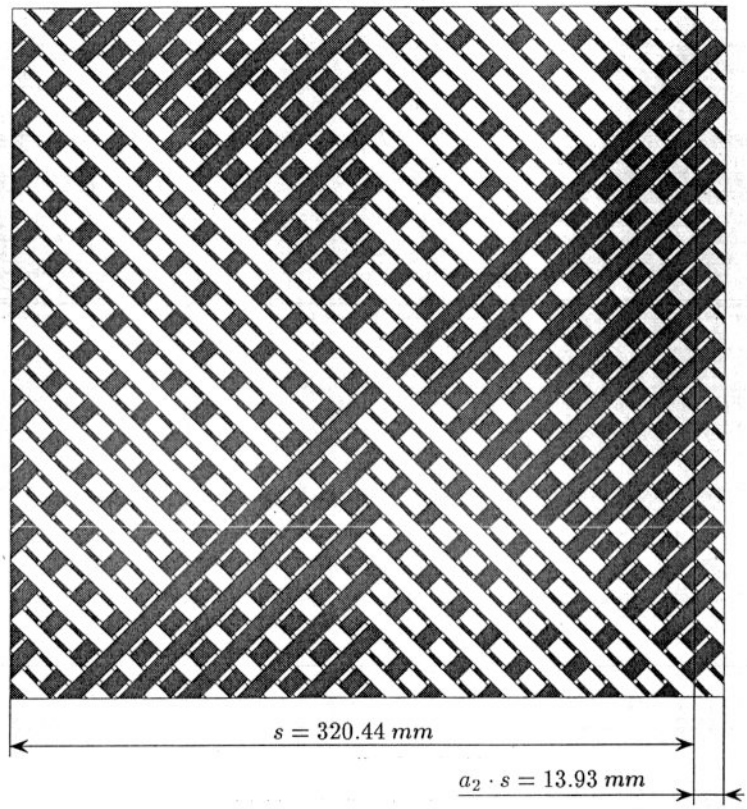
Liczba wiązek rowingu: 23																								$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$																							$= Nr/(2 \cdot 23)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	1/46
2	12	1	13	2	14	3	15	4	16	5	17	6	18	7	19	8	20	9	21	10	22	11	23	2/46
3	8	16	1	9	17	2	10	18	3	11	19	4	12	20	5	13	21	6	14	22	7	15	23	3/46
4	6	12	18	1	7	13	19	2	8	14	20	3	9	15	21	4	10	16	22	5	11	17	23	4/46
5	14	5	19	10	1	15	6	20	11	2	16	7	21	12	3	17	8	22	13	4	18	9	23	5/46
6	4	8	12	16	20	1	5	9	13	17	21	2	6	10	14	18	22	3	7	11	15	19	23	6/46
7	10	20	7	17	4	14	1	11	21	8	18	5	15	2	12	22	9	19	6	16	3	13	23	7/46
8	3	6	9	12	15	18	21	1	4	7	10	13	16	19	22	2	5	8	11	14	17	20	23	8/46
9	18	13	8	3	21	16	11	6	1	19	14	9	4	22	17	12	7	2	20	15	10	5	23	9/46
10	7	14	21	5	12	19	3	10	17	1	8	15	22	6	13	20	4	11	18	2	9	16	23	10/46
11	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	23	11/46

Tablica 23/1



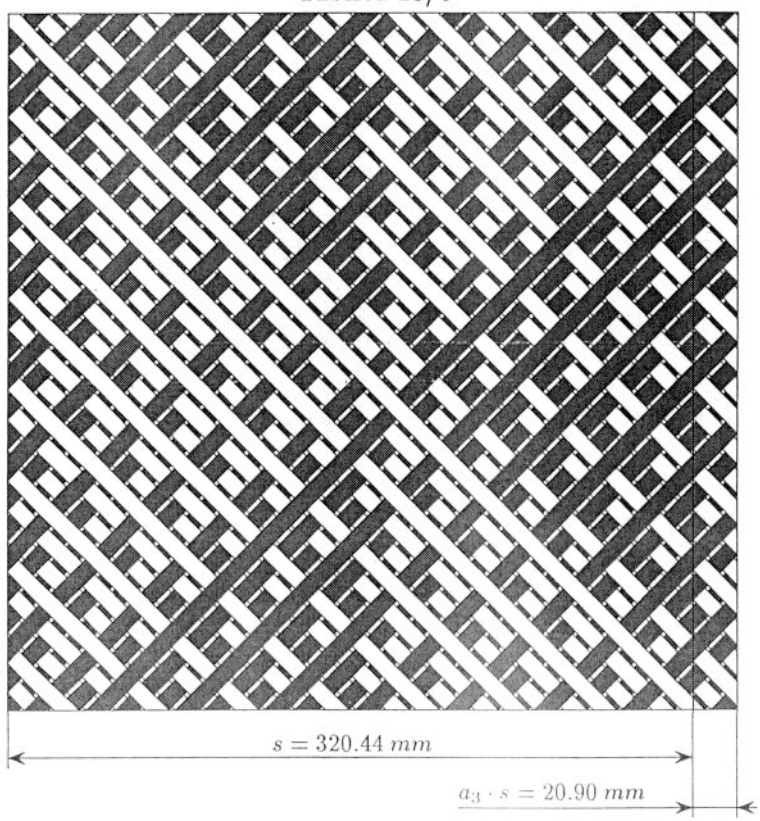
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/2



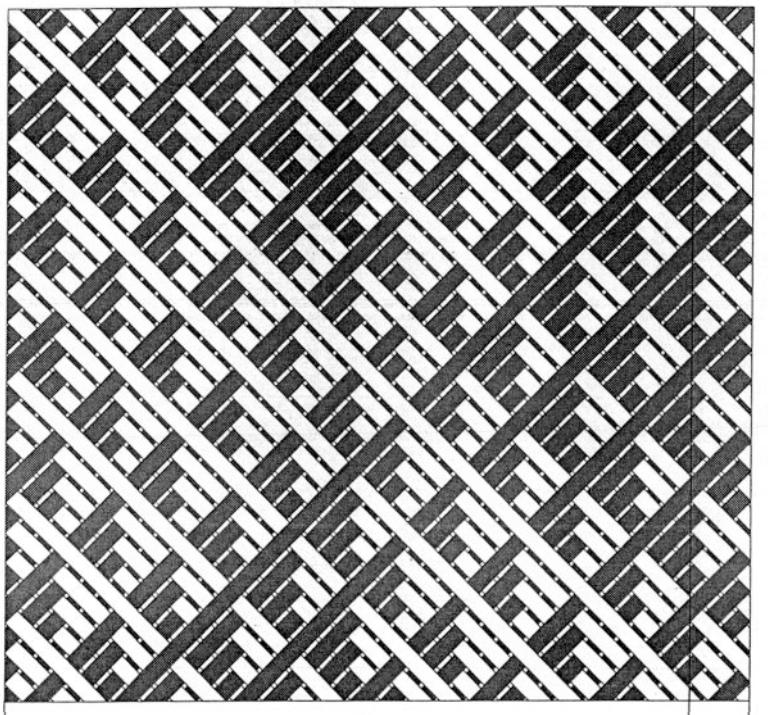
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/3



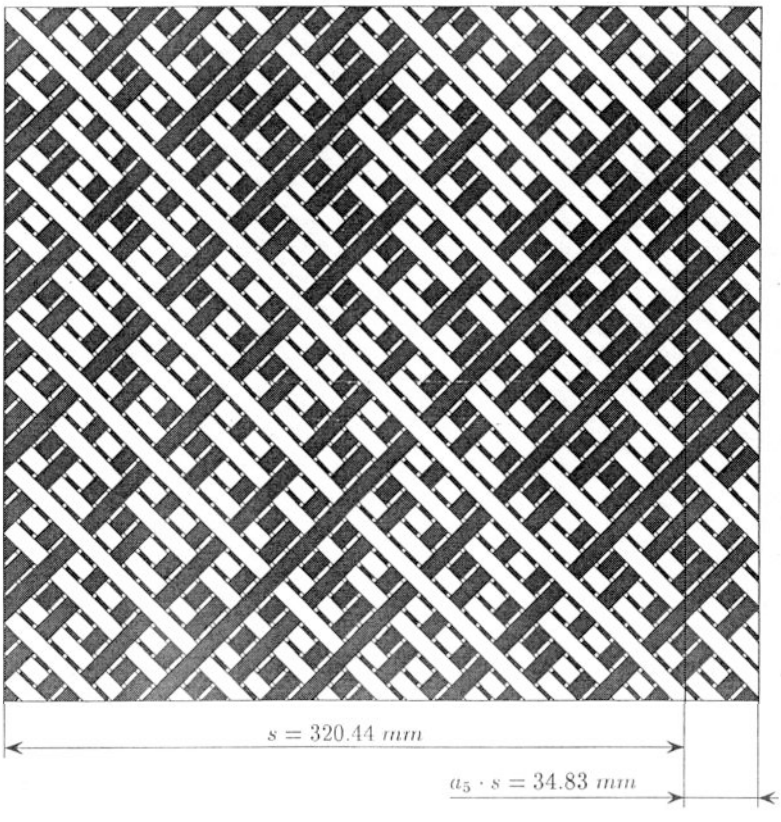
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/4



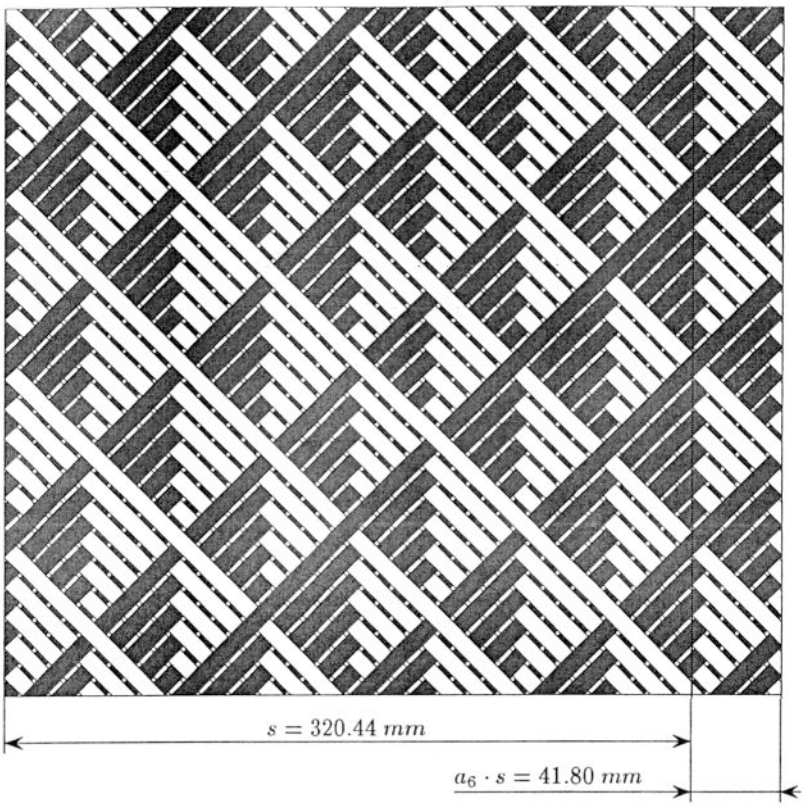
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/5



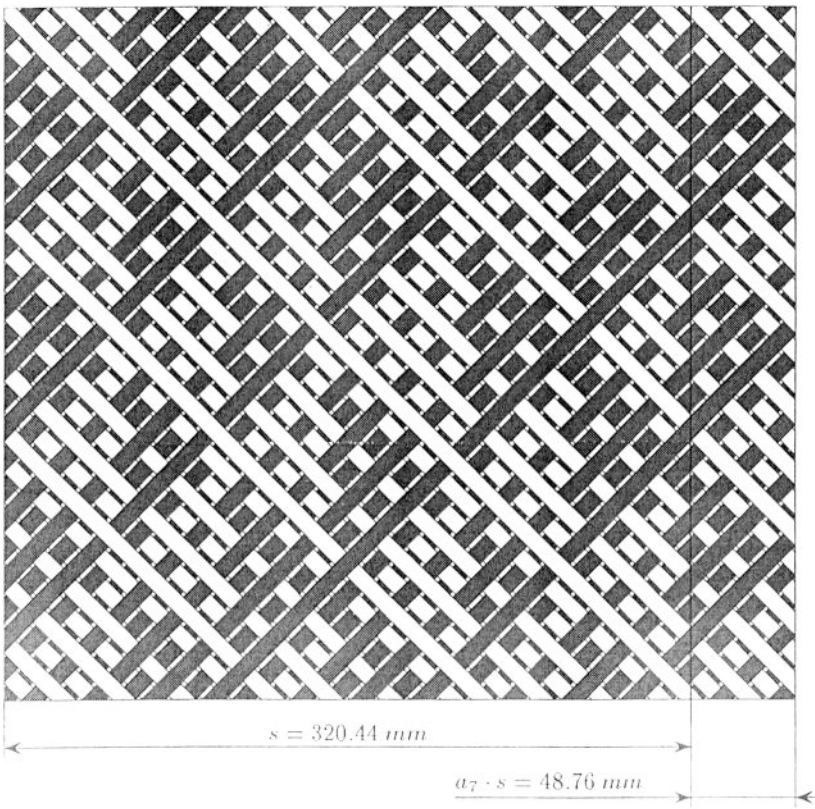
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/6



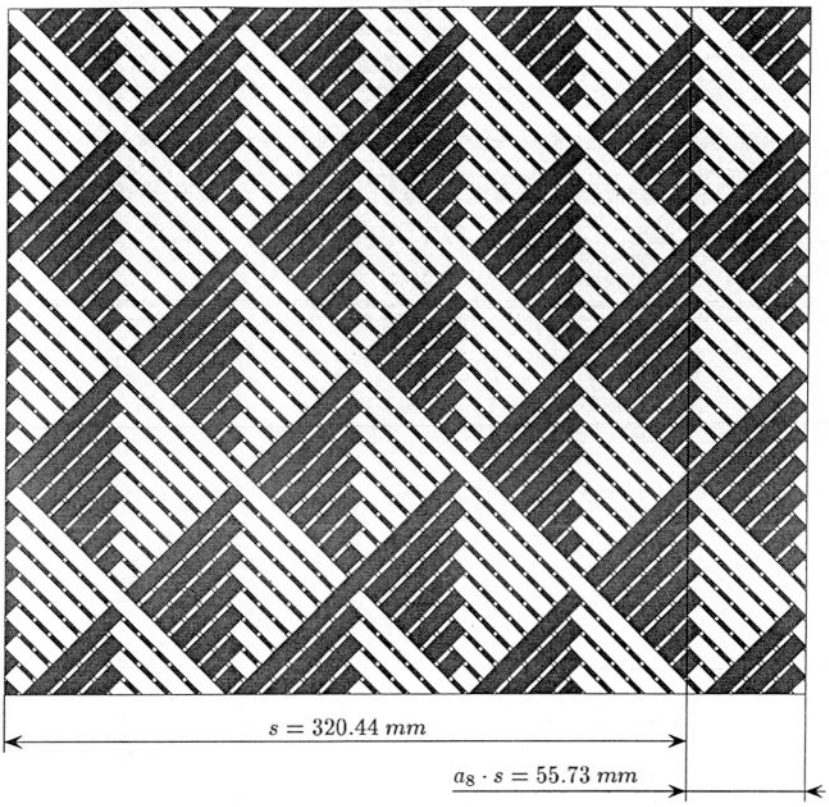
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/7



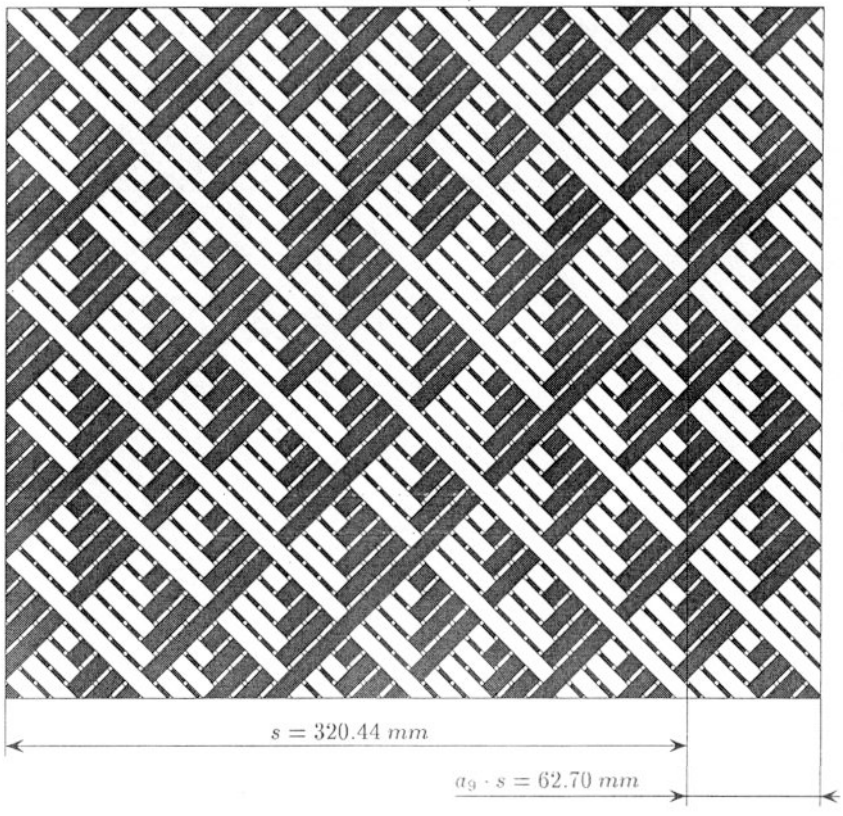
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/8



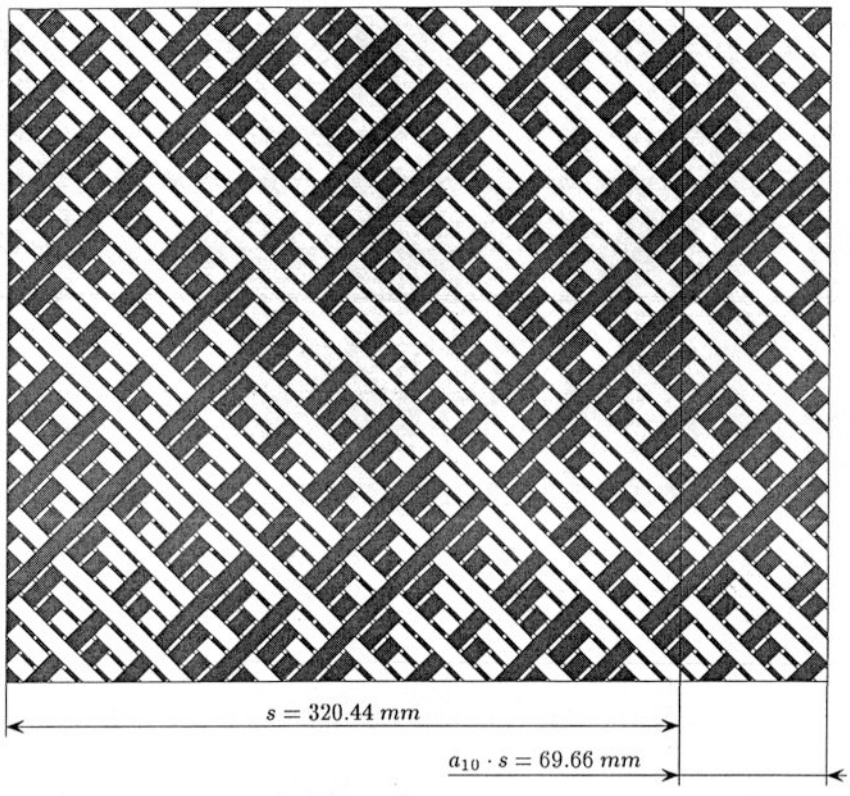
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/9



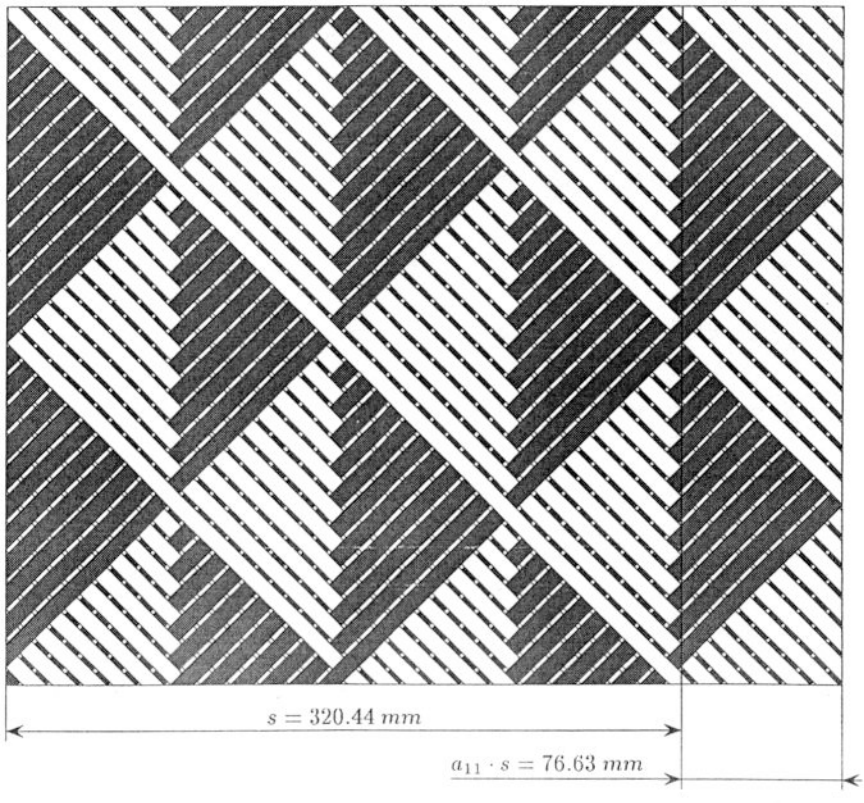
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 23/10



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

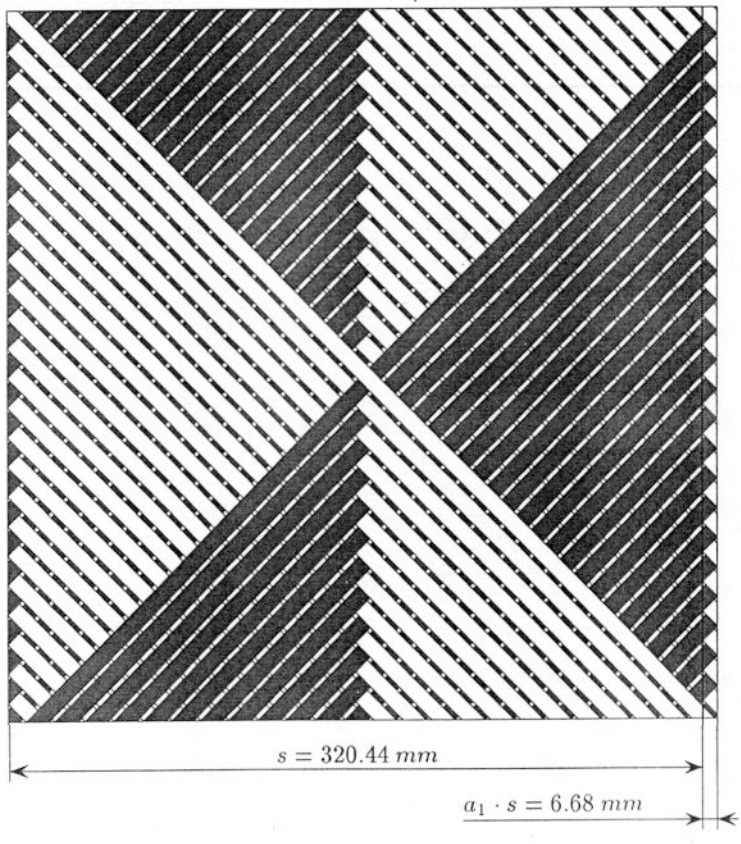
Tablica 23/11



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

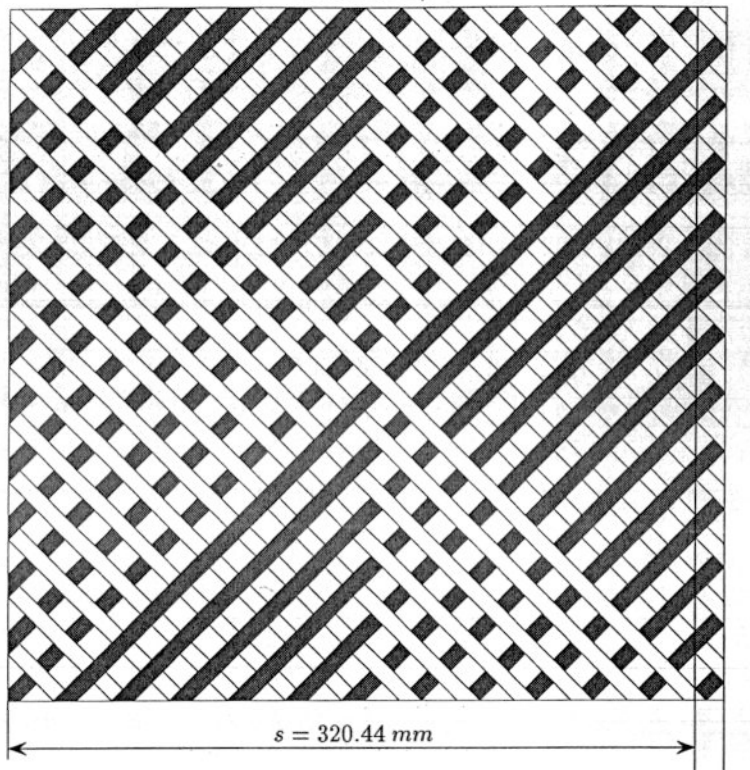
Liczba wiązek rowingu: 24																									$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow$																								$= Nr/(2 \cdot 24)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1/48
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	2/48
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	3/48
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0	5	0	0	0	6	4/48
5	5	10	15	20	1	6	11	16	21	2	7	12	17	22	3	8	13	18	23	4	9	14	19	24	5/48
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	4	6/48
7	7	14	21	4	11	18	1	8	15	22	5	12	19	2	9	16	23	6	13	20	3	10	17	24	7/48
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	8/48
9	0	0	3	0	0	6	0	0	1	0	0	4	0	0	7	0	0	2	0	0	5	0	0	8	9/48
10	0	5	0	10	0	3	0	8	0	1	0	6	0	11	0	4	0	9	0	2	0	7	0	12	10/48
11	11	22	9	20	7	18	5	16	3	14	1	12	23	10	21	8	19	6	17	4	15	2	13	24	11/48
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	12/48

Tablica 24/1



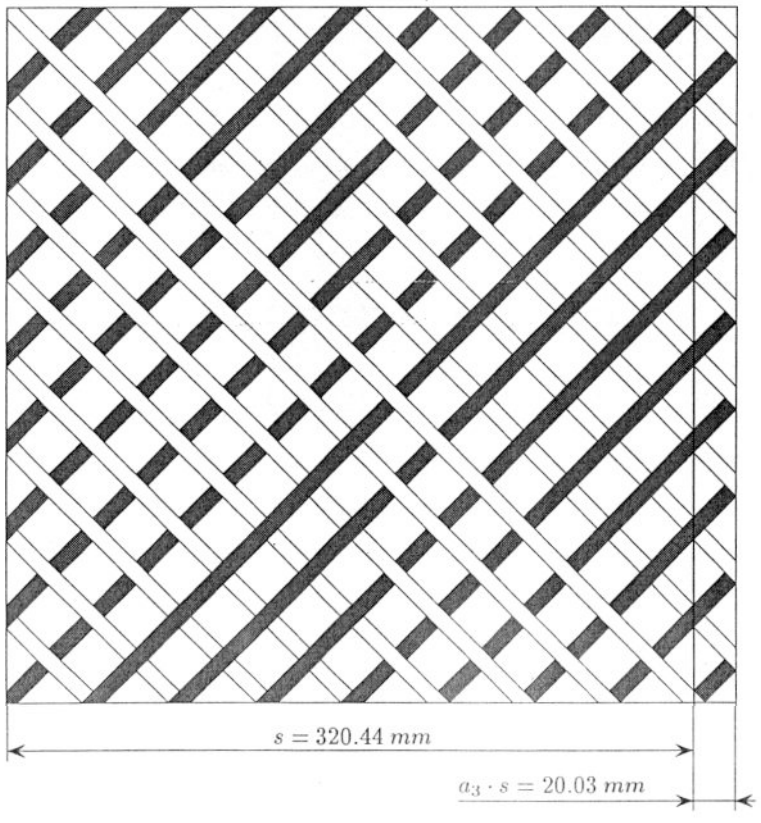
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/2



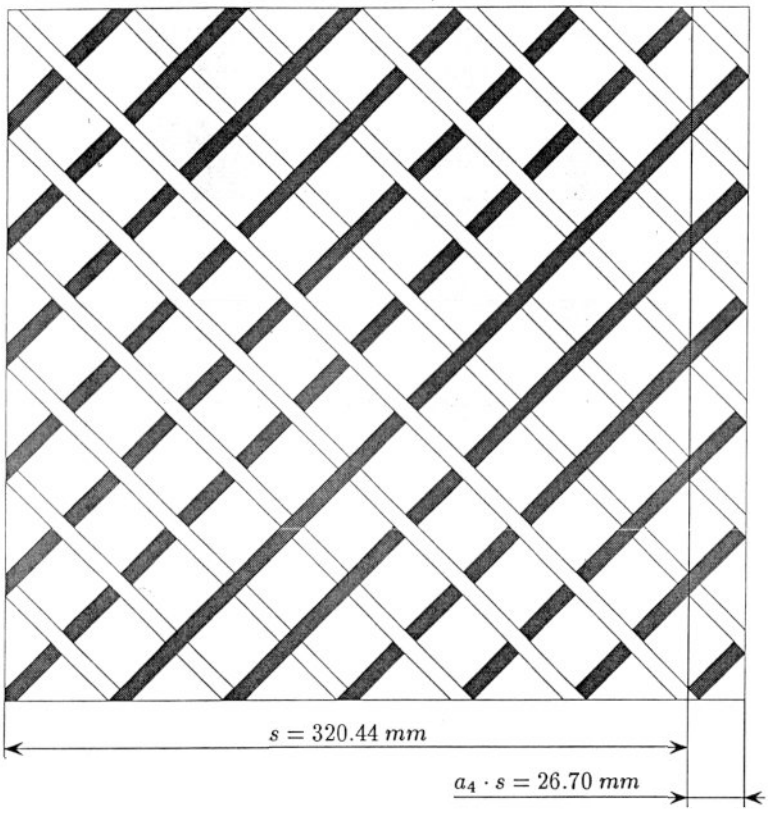
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/3



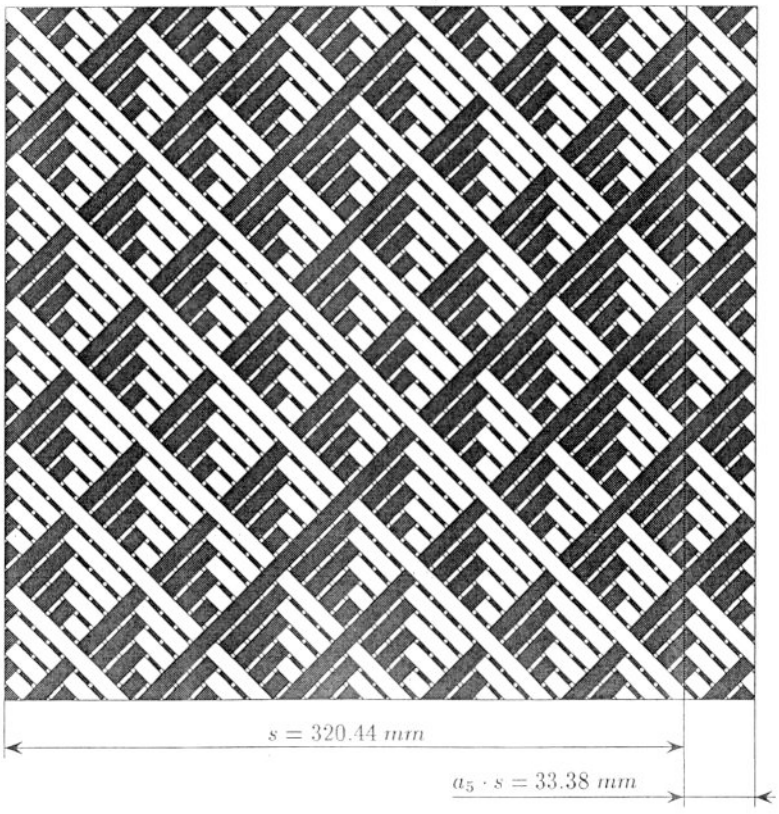
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/4



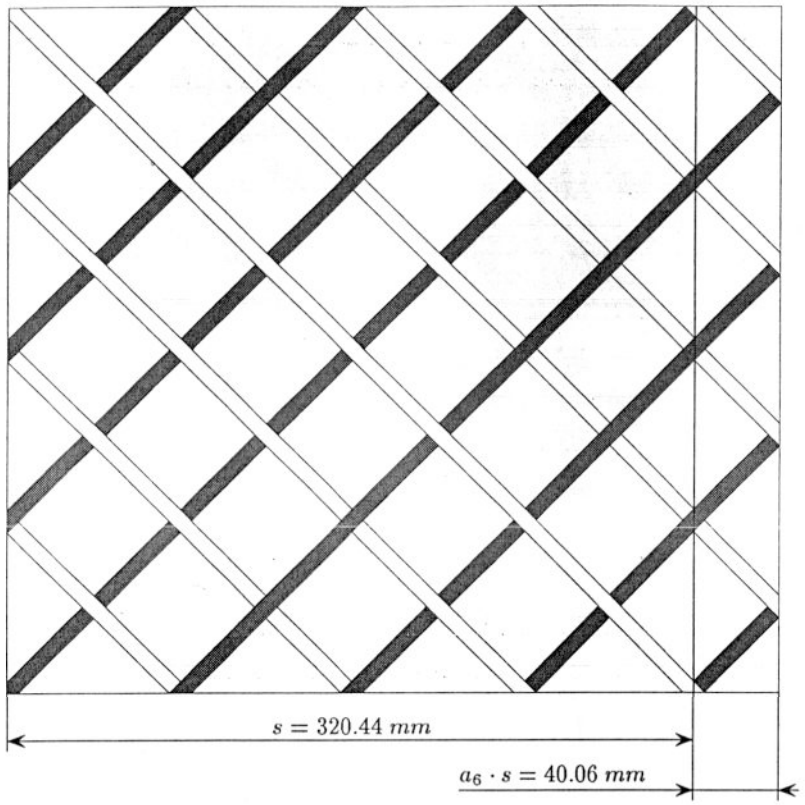
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/5



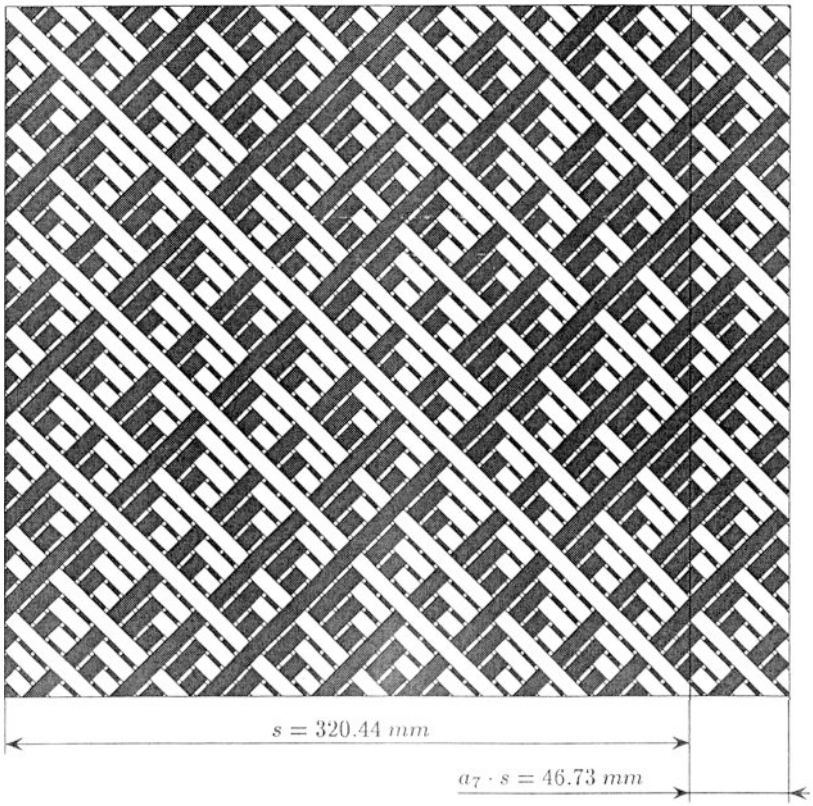
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/6



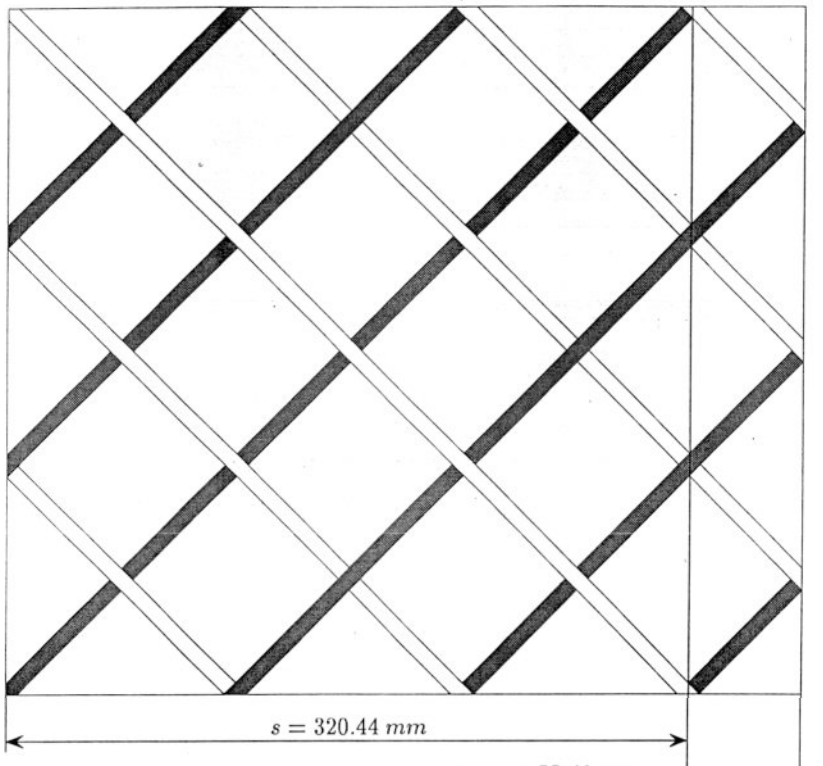
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/7



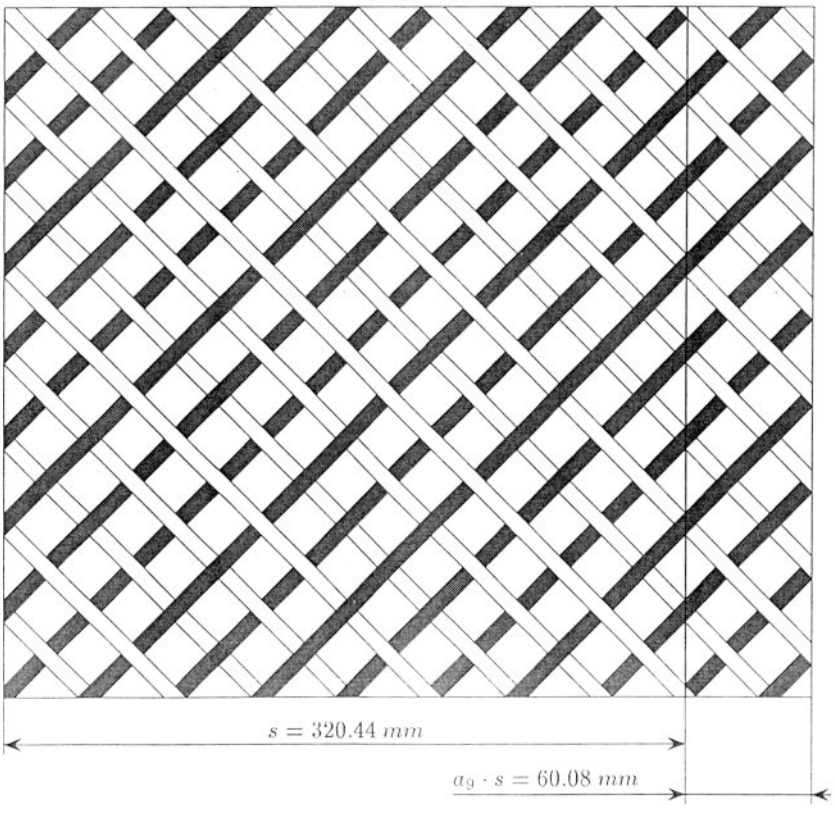
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/8



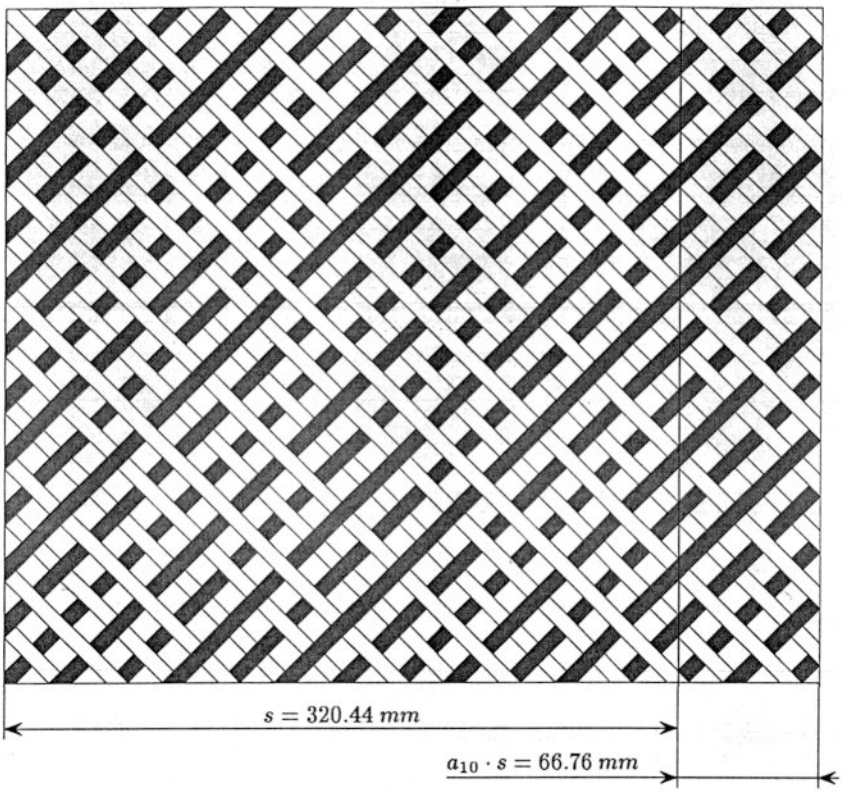
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/9



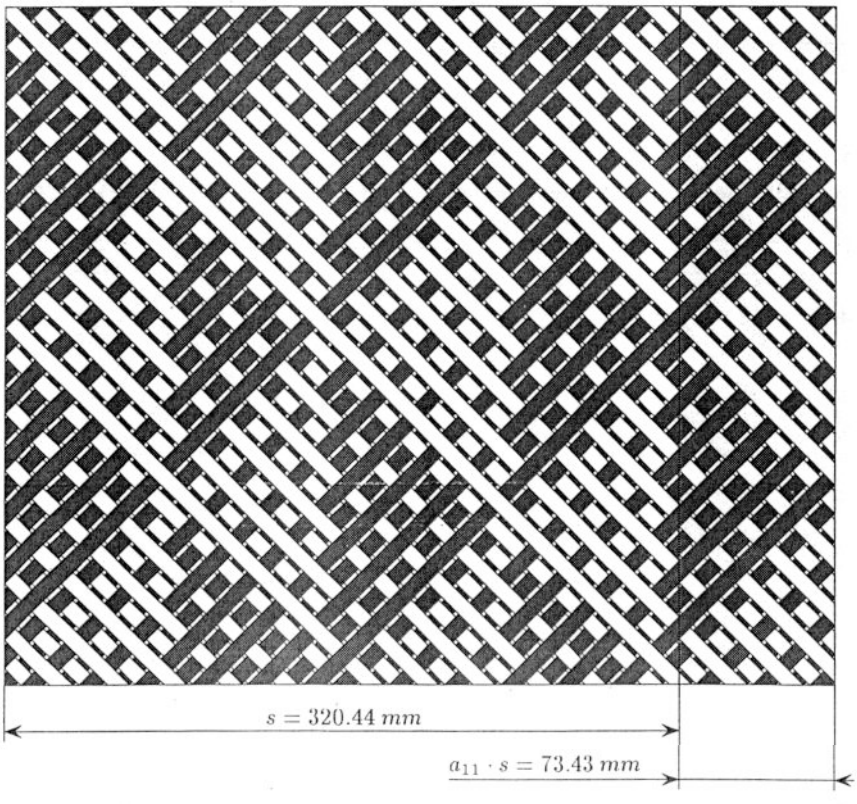
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/10



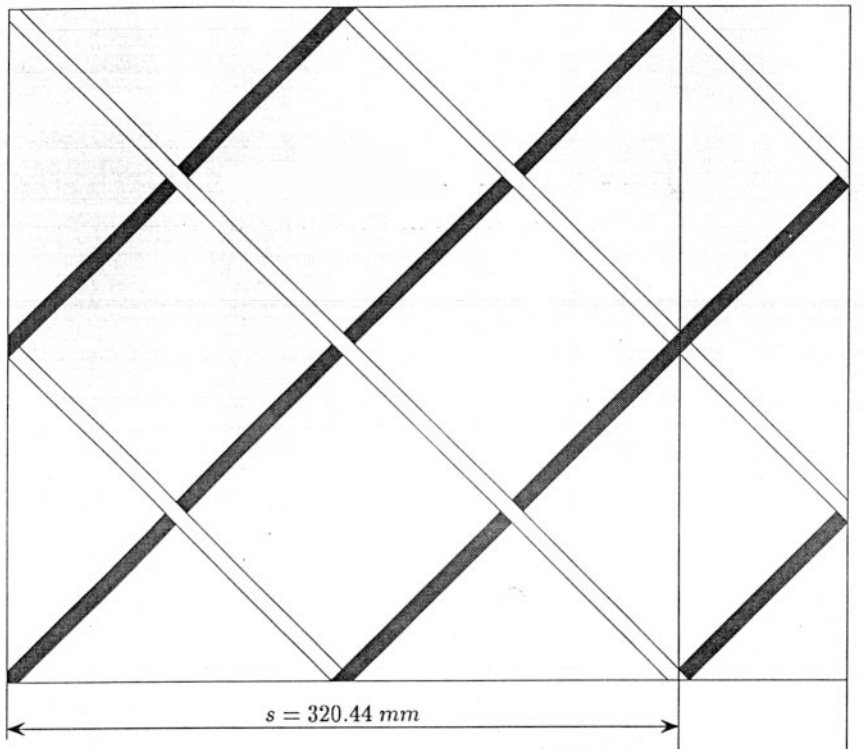
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 24/11



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

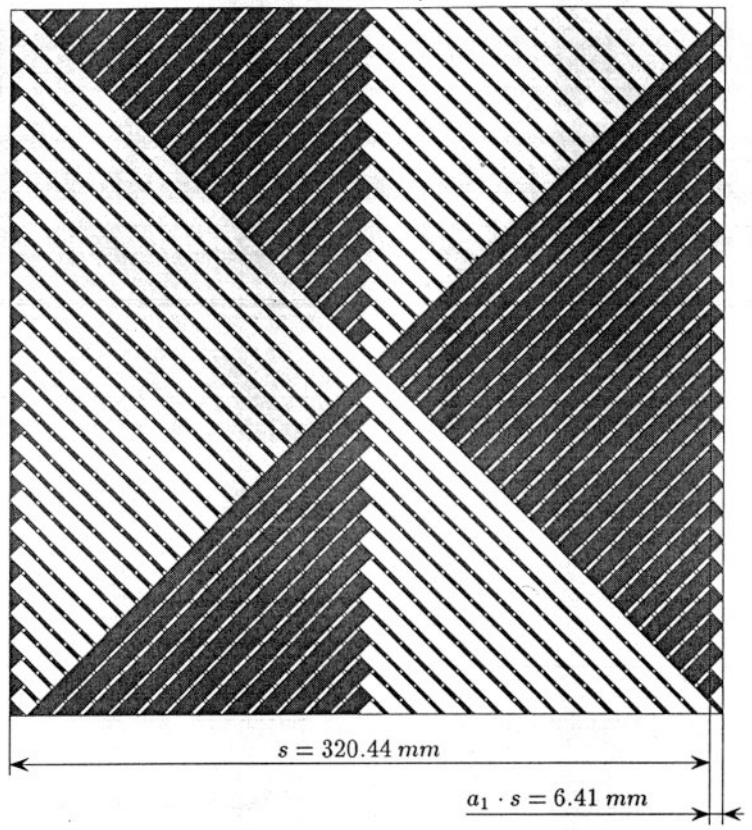
Tablica 24/12



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

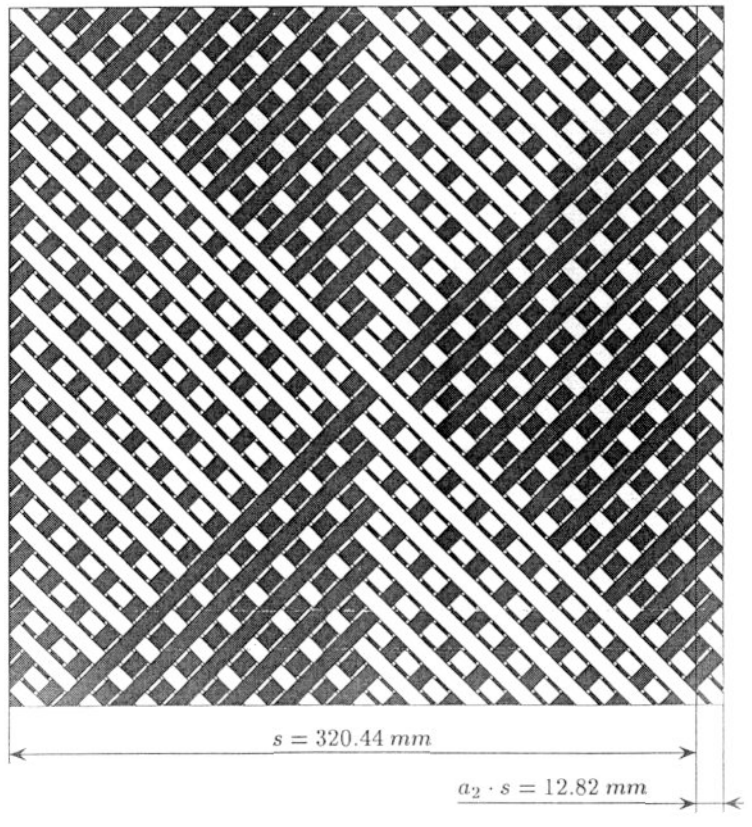
Liczba wiązek rowingu: 25																									$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																								$= Nr/(2 \cdot 25)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	1/50
2	13	1	14	2	15	3	16	4	17	5	18	6	19	7	20	8	21	9	22	10	23	11	24	12	25	2/50
3	17	9	1	18	10	2	19	11	3	20	12	4	21	13	5	22	14	6	23	15	7	24	16	8	25	3/50
4	19	13	7	1	20	14	8	2	21	15	9	3	22	16	10	4	23	17	11	5	24	18	12	6	25	4/50
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	5	5/50
6	21	17	13	9	5	1	22	18	14	10	6	2	23	19	15	11	7	3	24	20	16	12	8	4	25	6/50
7	18	11	4	22	15	8	1	19	12	5	23	16	9	2	20	13	6	24	17	10	3	21	14	7	25	7/50
8	22	19	16	13	10	7	4	1	23	20	17	14	11	8	5	2	24	21	18	15	12	9	6	3	25	8/50
9	14	3	17	6	20	9	23	12	1	15	4	18	7	21	10	24	13	2	16	5	19	8	22	11	25	9/50
10	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	5	10/50
11	16	7	23	14	5	21	12	3	19	10	1	17	8	24	15	6	22	13	4	20	11	2	18	9	25	11/50
12	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	25	12/50

Tablica 25/1



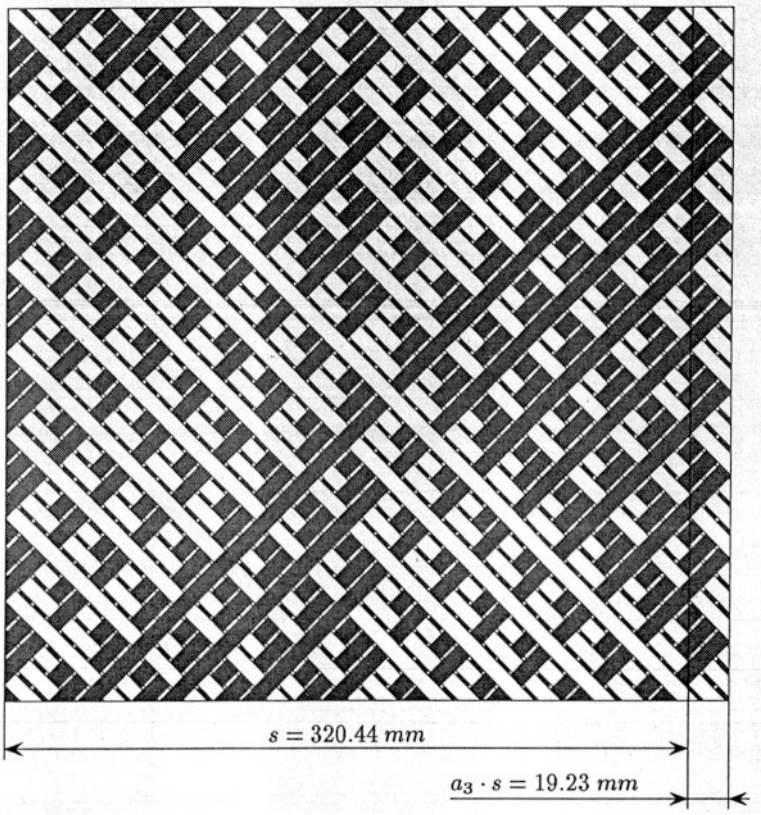
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/2



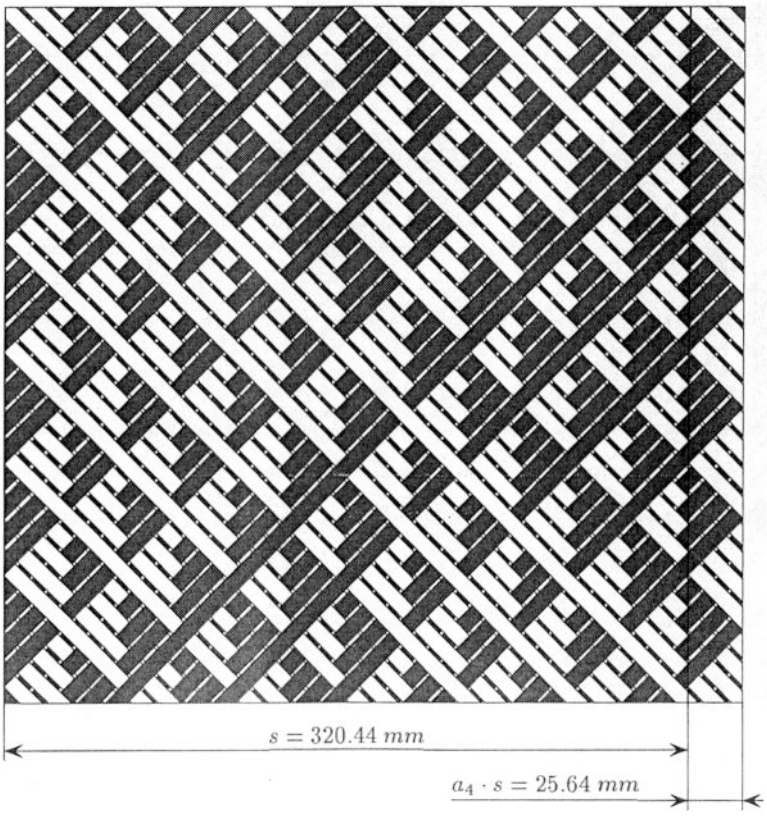
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/3



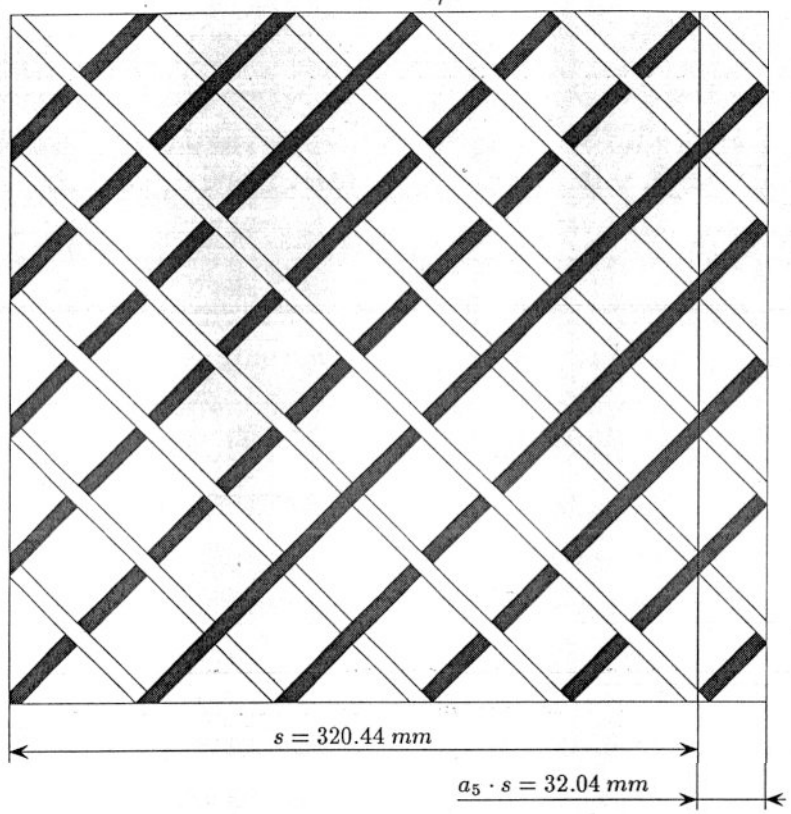
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/4



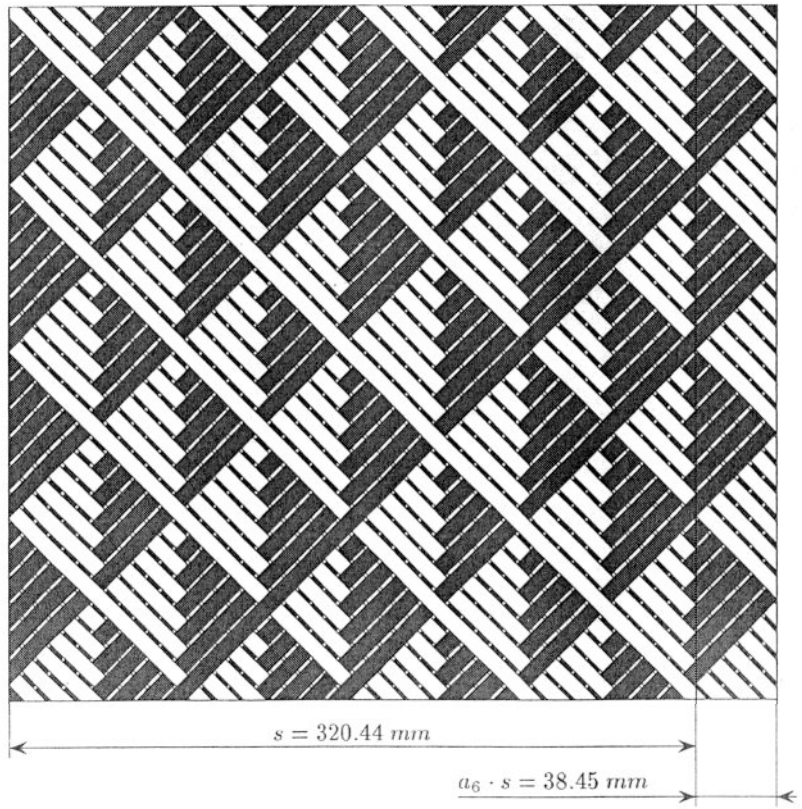
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/5



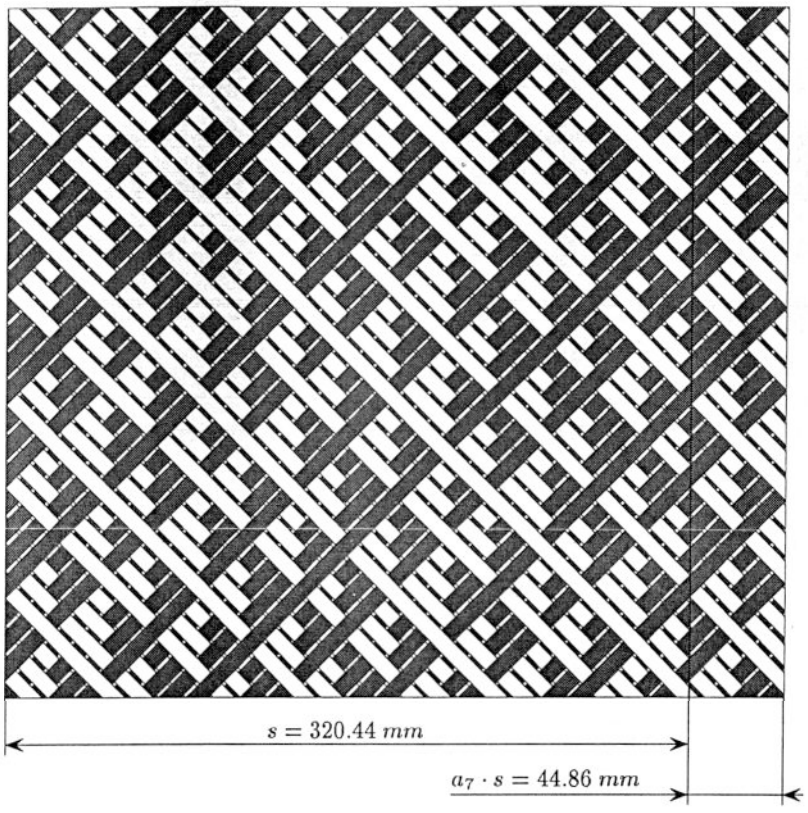
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/6



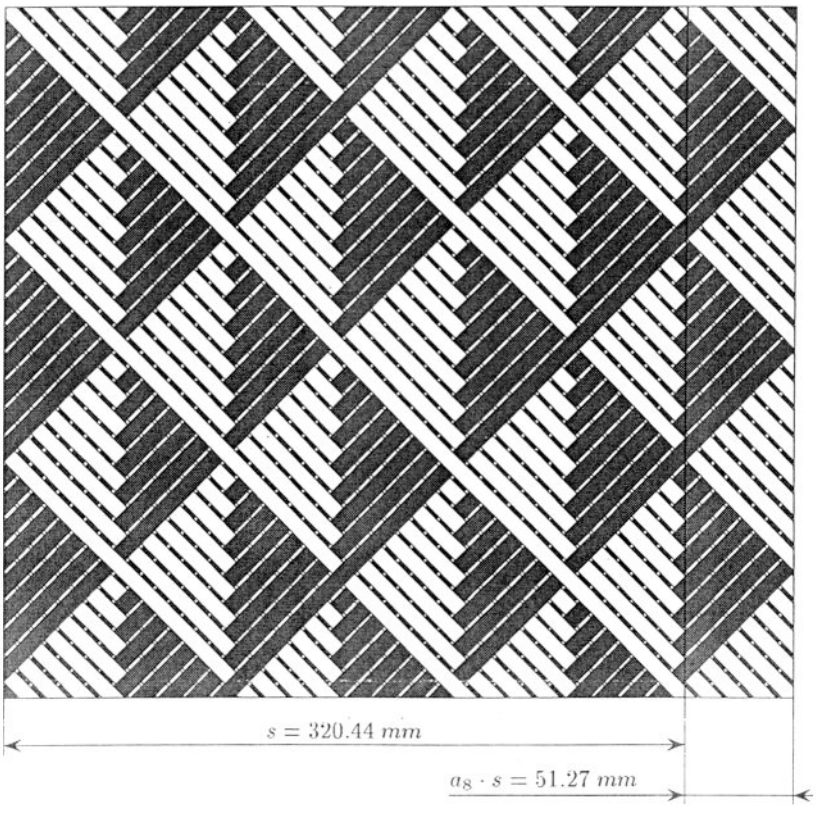
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/7



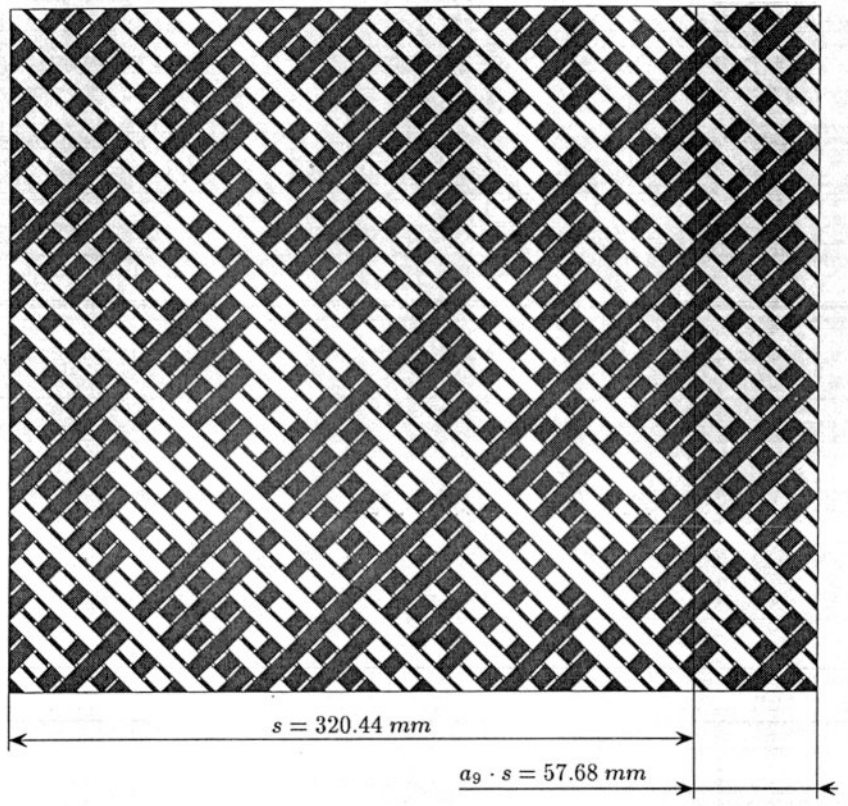
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/8



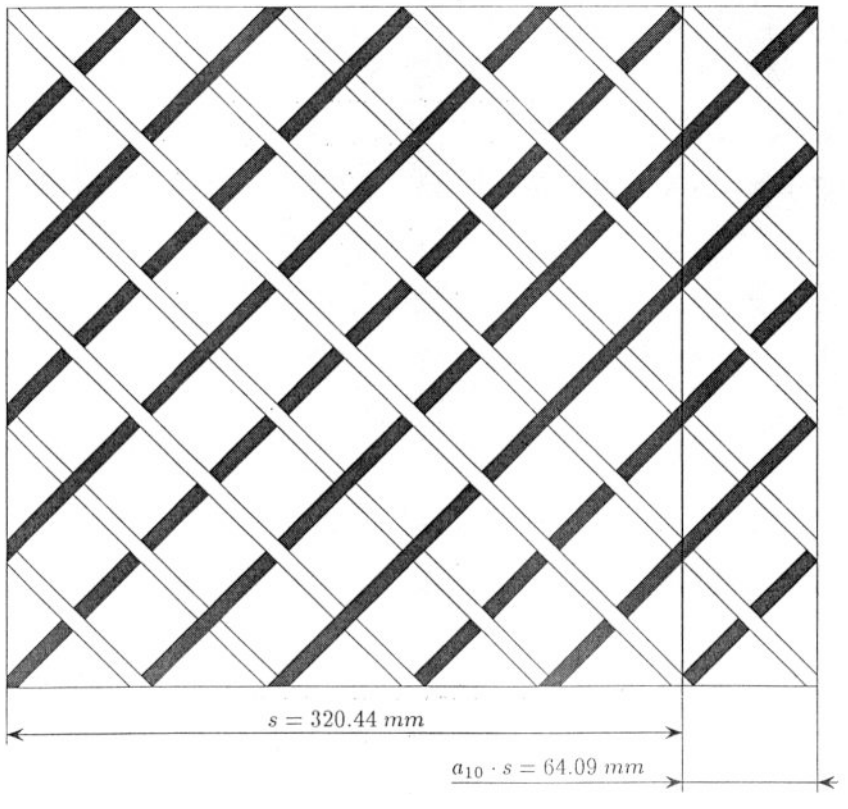
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/9



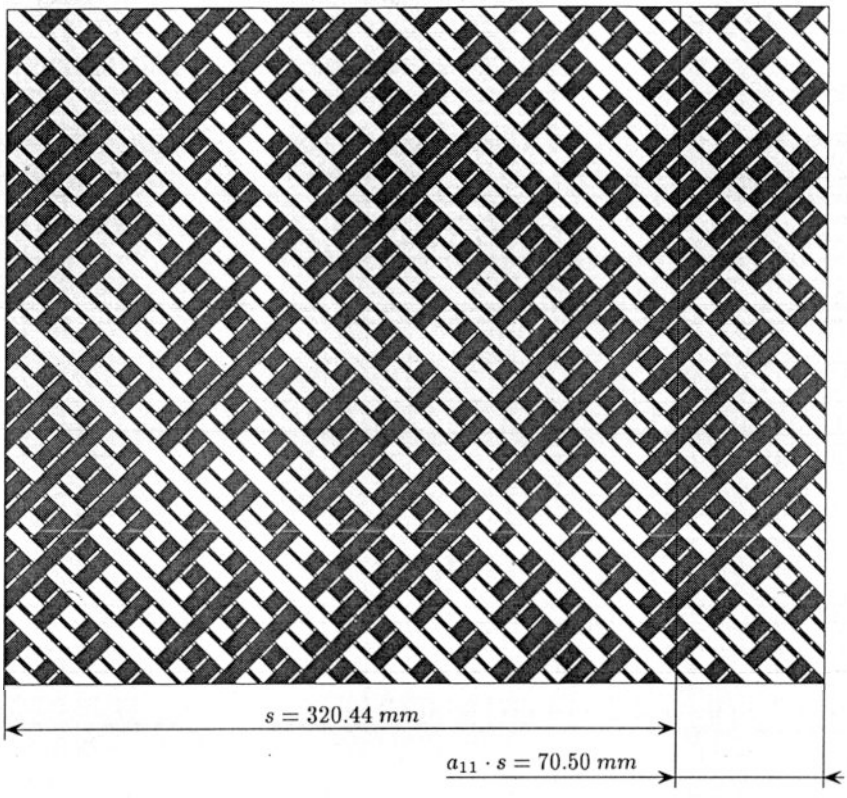
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/10



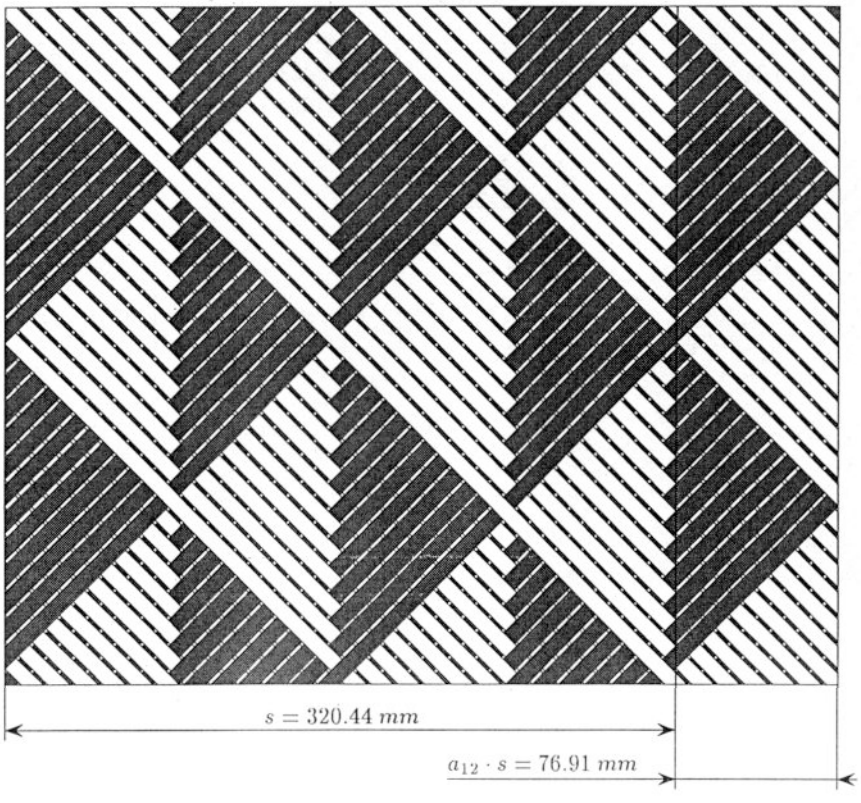
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 25/11



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

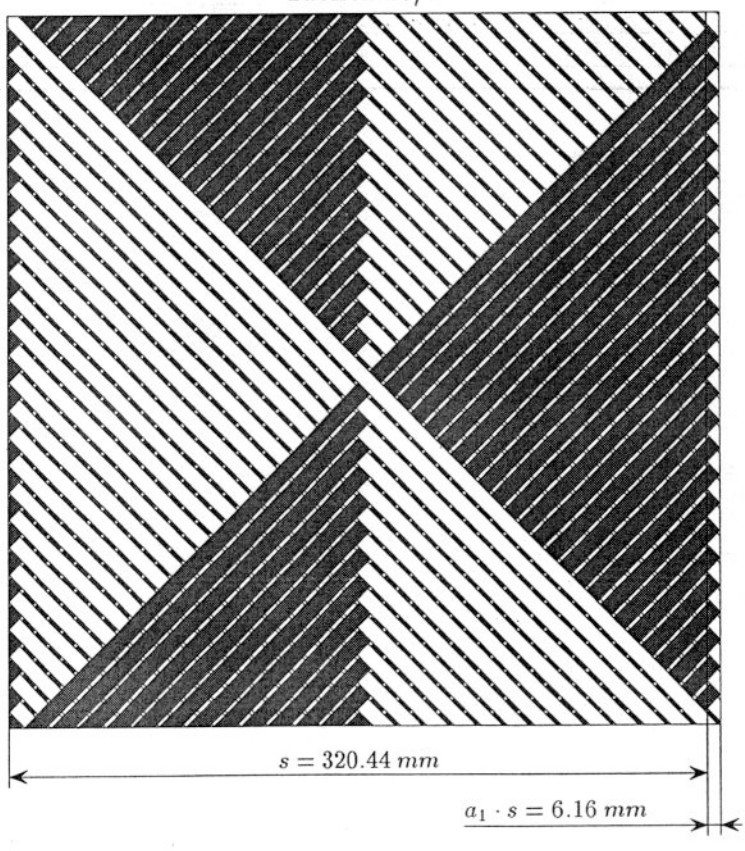
Tablica 25/12



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

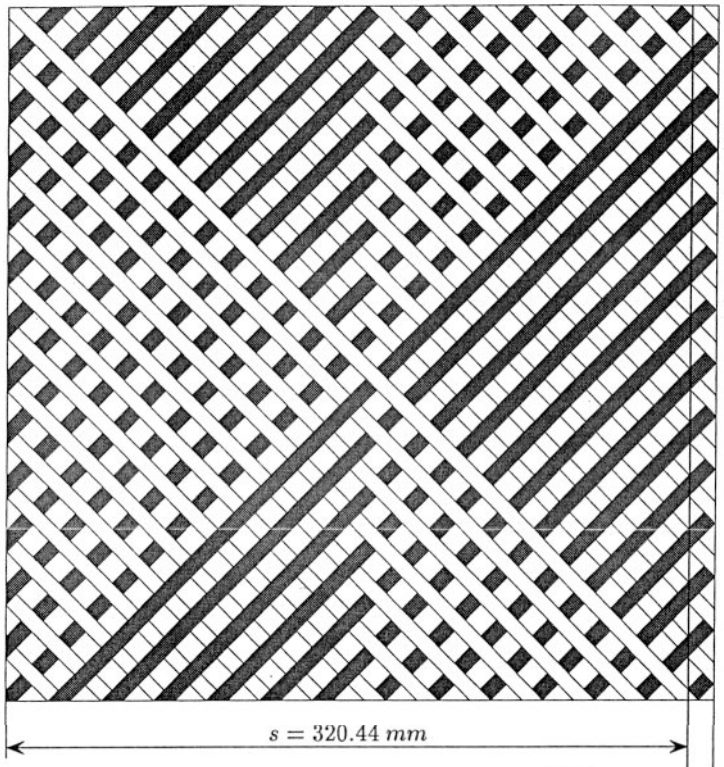
Liczba wiązek rowingu: 26																										$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow$																									$= Nr/(2 \cdot 26)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	1/52
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	2/52
3	9	18	1	10	19	2	11	20	3	12	21	4	13	22	5	14	23	6	15	24	7	16	25	8	17	26	3/52
4	0	7	0	1	0	8	0	2	0	9	0	3	0	10	0	4	0	11	0	5	0	12	0	6	0	13	4/52
5	21	16	11	6	1	22	17	12	7	2	23	18	13	8	3	24	19	14	9	4	25	20	15	10	5	26	5/52
6	0	9	0	5	0	1	0	10	0	6	0	2	0	11	0	7	0	3	0	12	0	8	0	4	0	13	6/52
7	15	4	19	8	23	12	1	16	5	20	9	24	13	2	17	6	21	10	25	14	3	18	7	22	11	26	7/52
8	0	10	0	7	0	4	0	1	0	11	0	8	0	5	0	2	0	12	0	9	0	6	0	3	0	13	8/52
9	3	6	9	12	15	18	21	24	1	4	7	10	13	16	19	22	25	2	5	8	11	14	17	20	23	26	9/52
10	0	8	0	3	0	11	0	6	0	1	0	9	0	4	0	12	0	7	0	2	0	10	0	5	0	13	10/52
11	19	12	5	24	17	10	3	22	15	8	1	20	13	6	25	18	11	4	23	16	9	2	21	14	7	26	11/52
12	0	11	0	9	0	7	0	5	0	3	0	1	0	12	0	10	0	8	0	6	0	4	0	2	0	13	12/52
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	13/52

Tablica 26/1



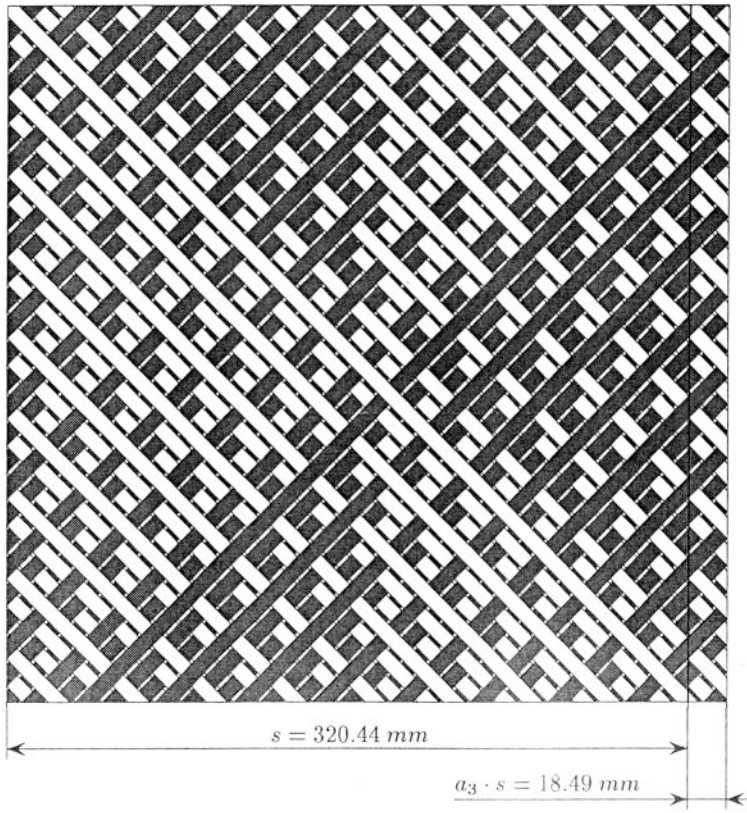
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/2



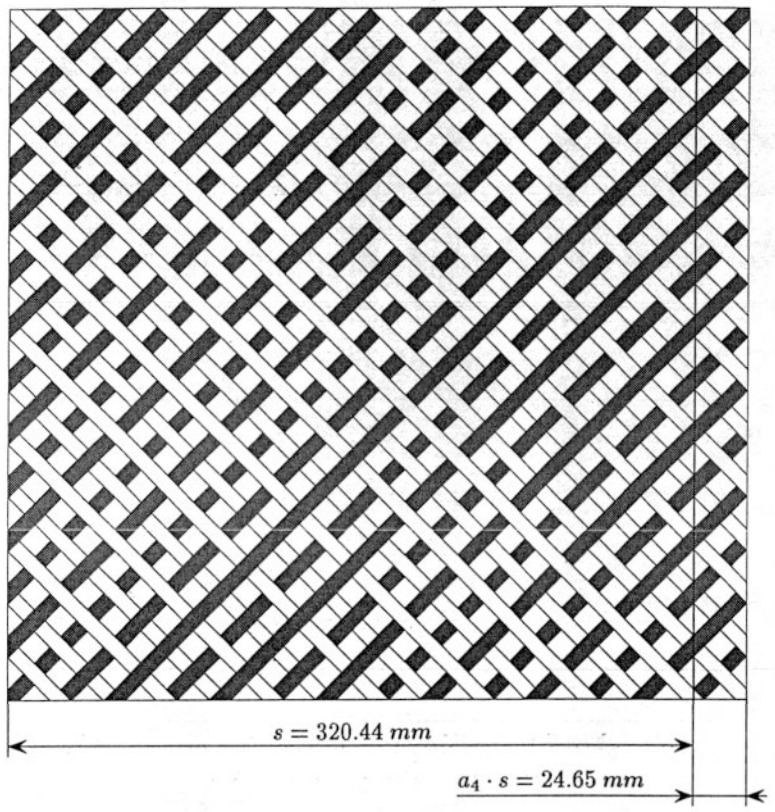
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/3



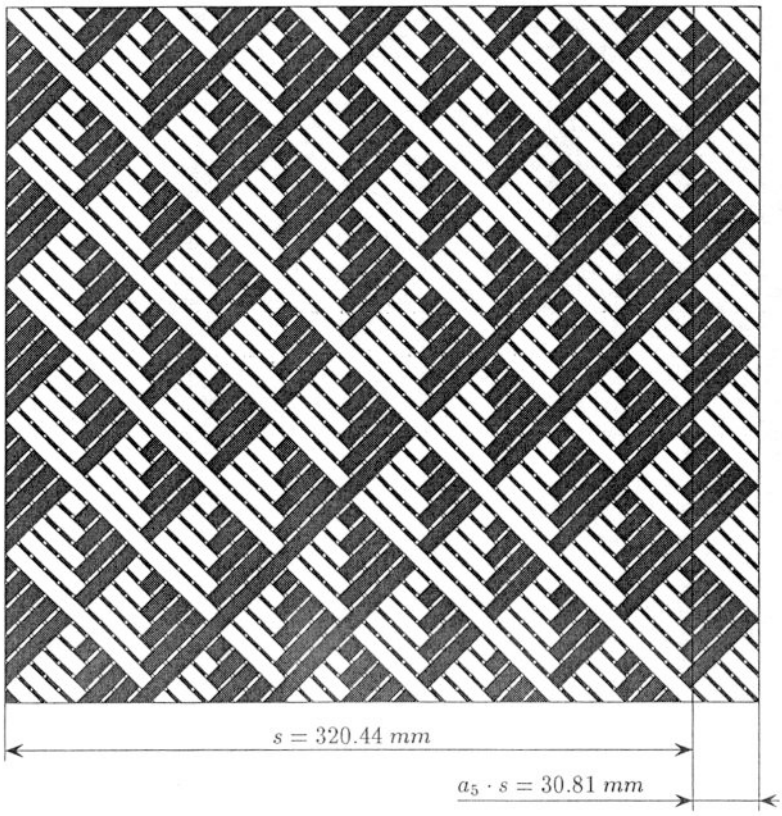
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/4



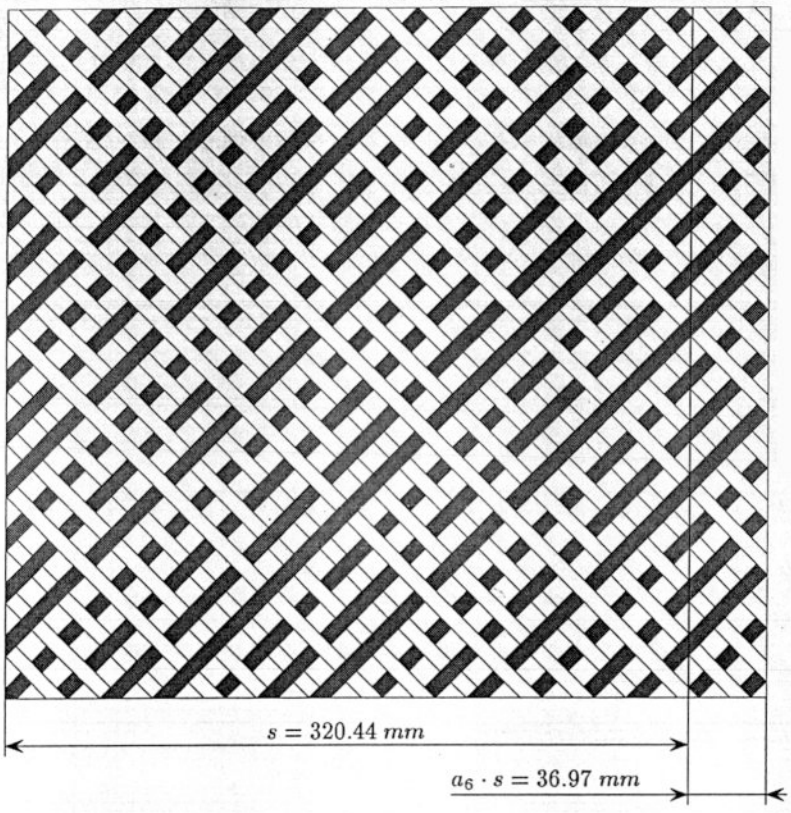
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/5



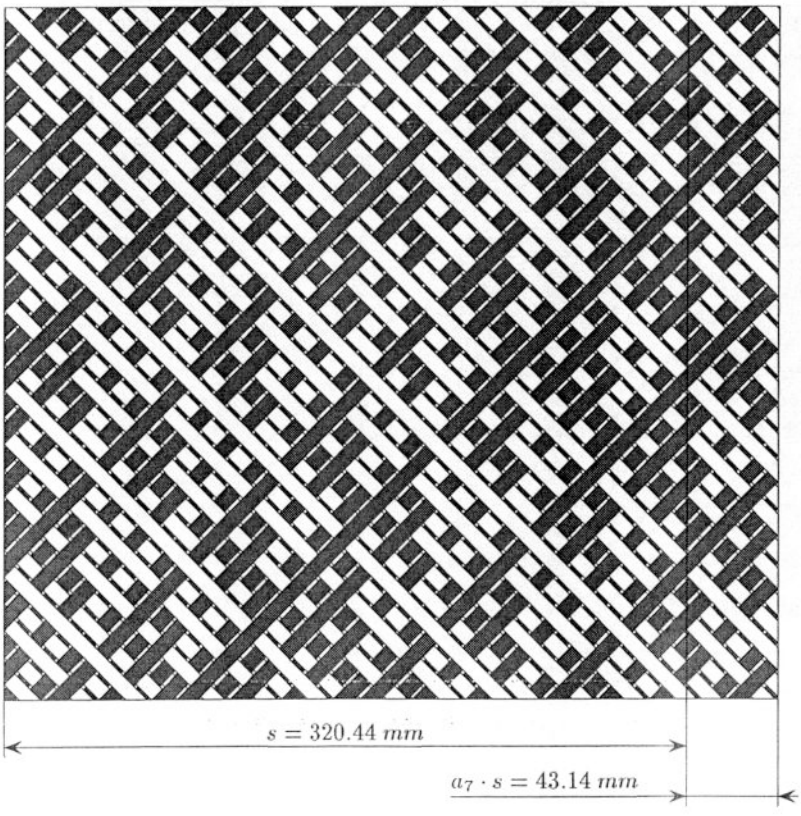
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/6



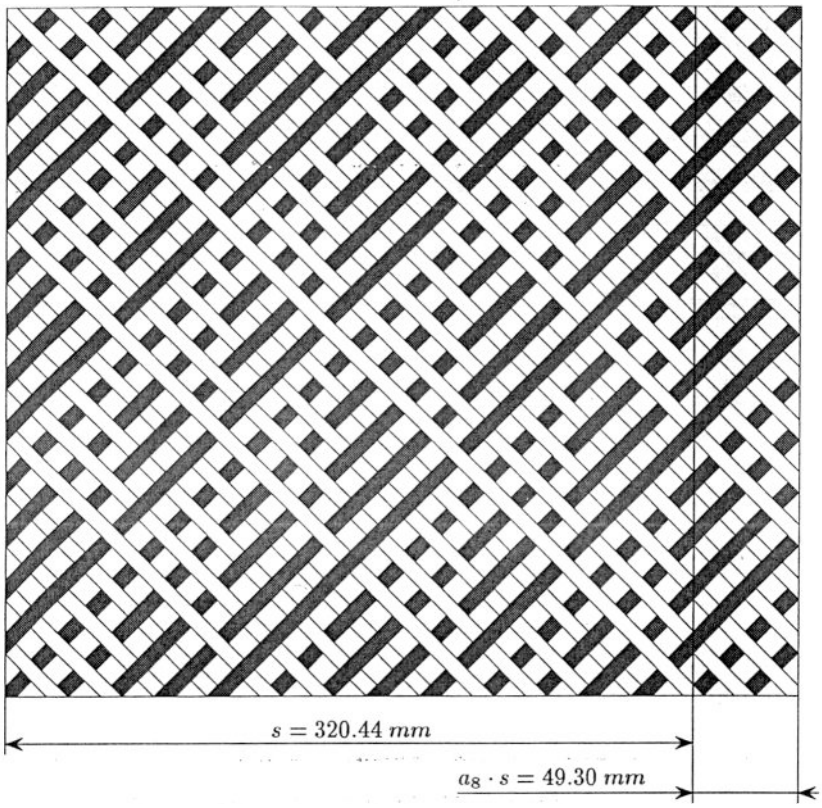
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/7



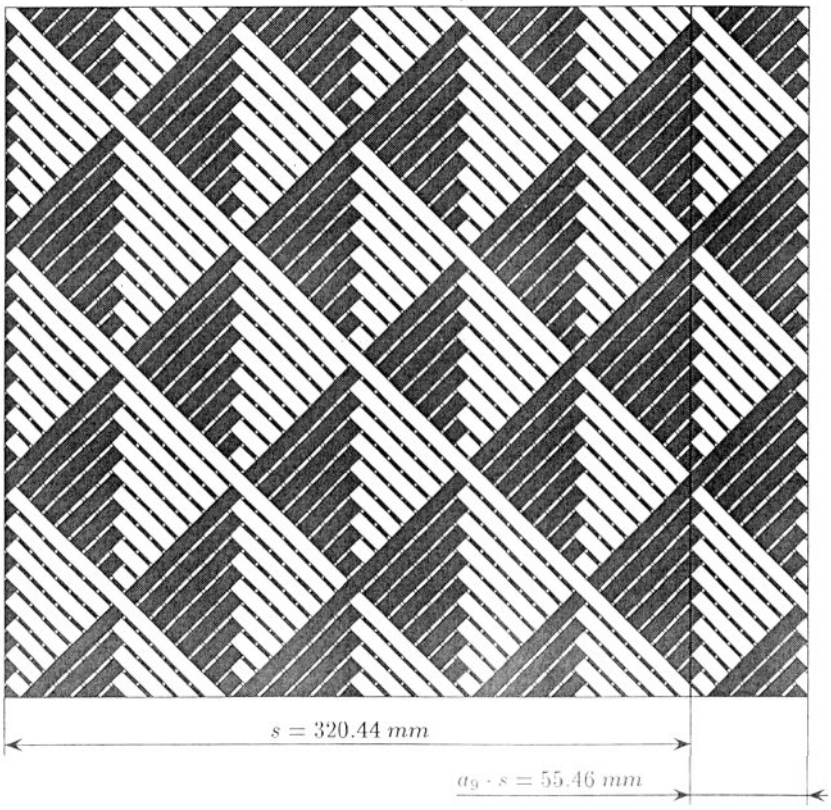
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/8



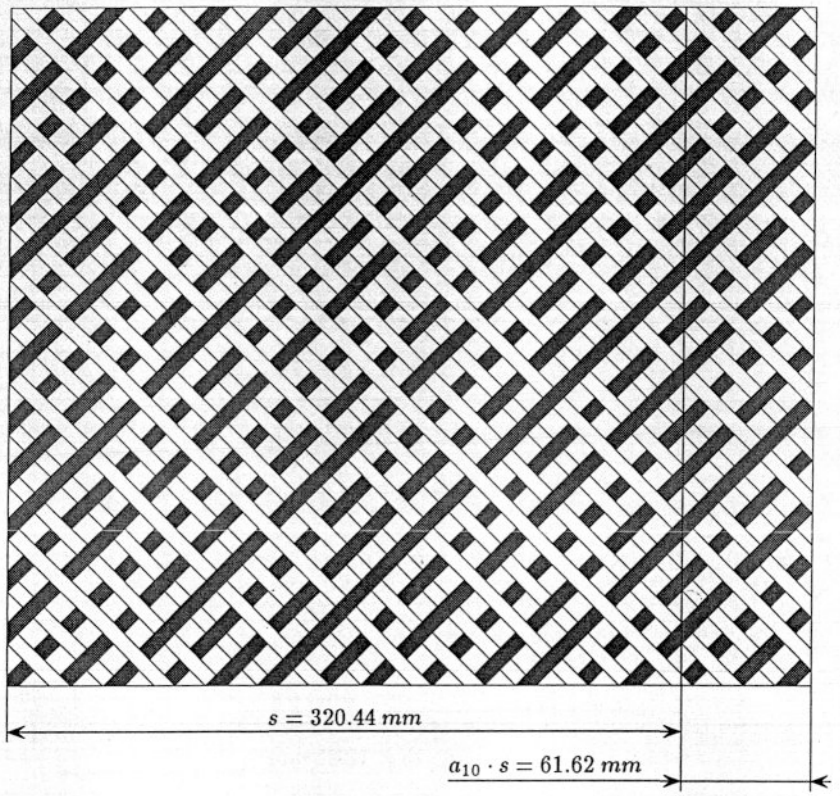
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/9



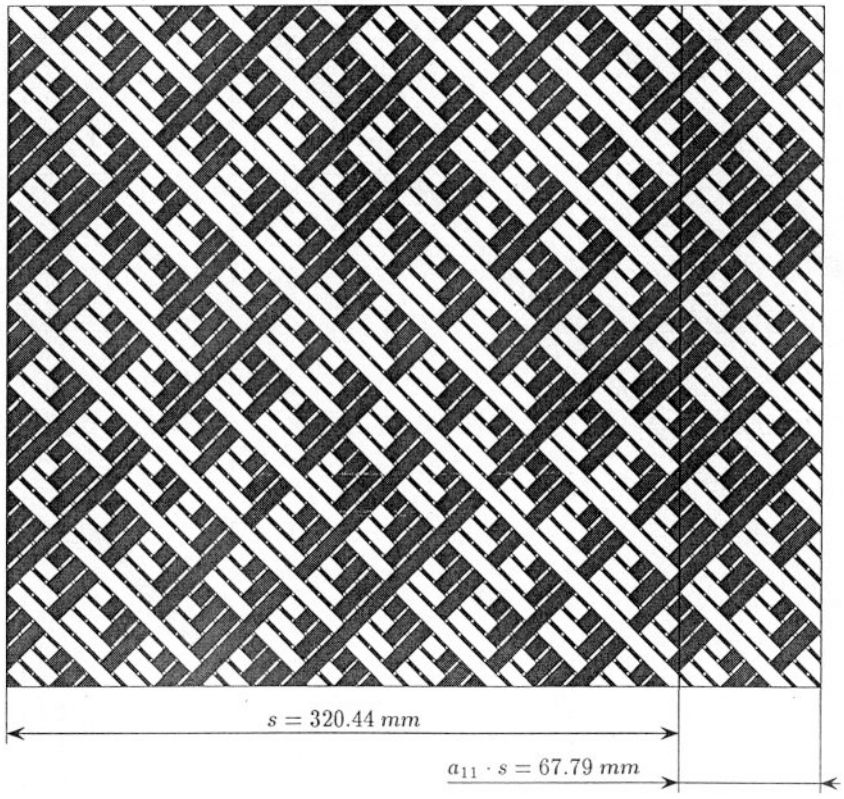
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/10



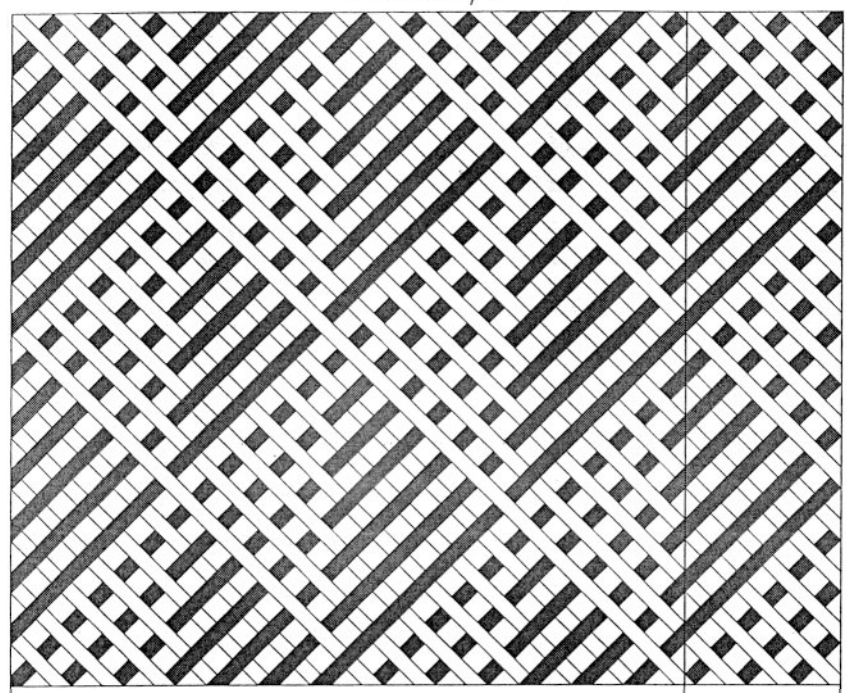
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/11



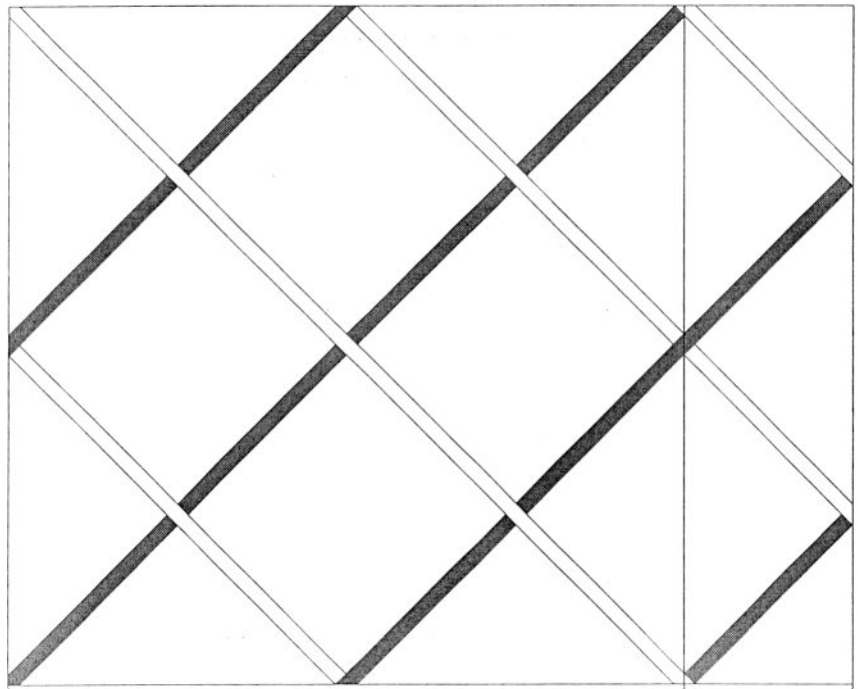
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 26/12



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

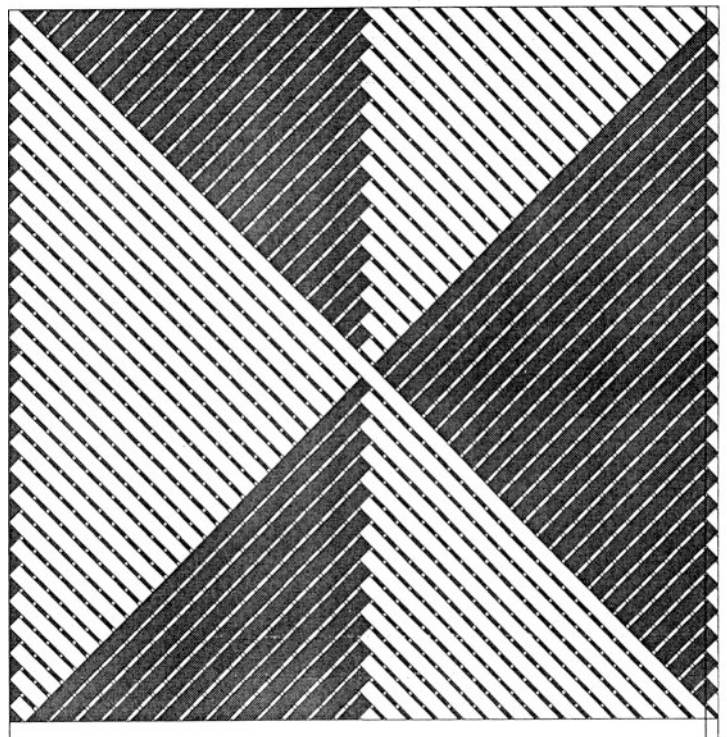
Tablica 26/13



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

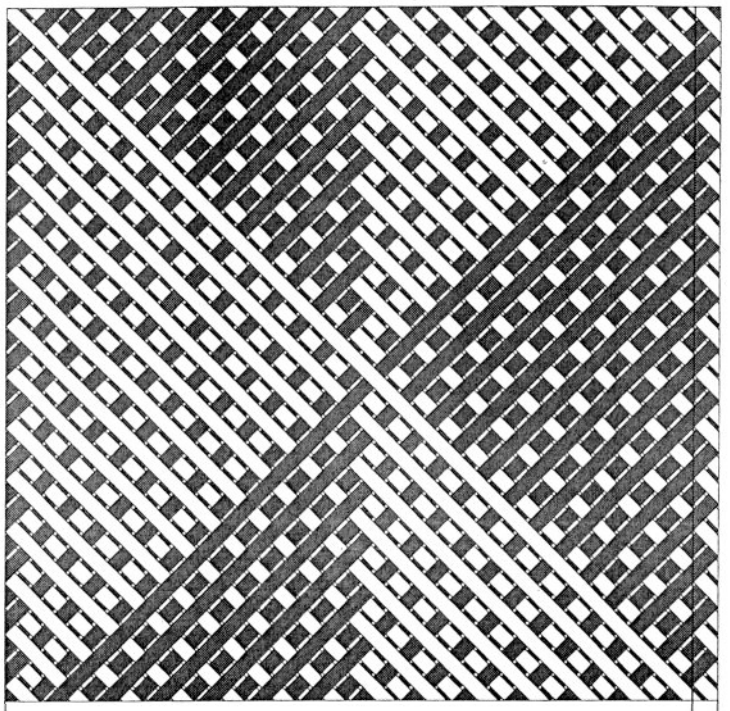
Liczba wiązek rowingu: 27																												$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow$																											$= Nr/(2 \cdot 27)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	1/54
2	14	1	15	2	16	3	17	4	18	5	19	6	20	7	21	8	22	9	23	10	24	11	25	12	26	13	27	2/54
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	0	0	9	3/54
4	7	14	21	1	8	15	22	2	9	16	23	3	10	17	24	4	11	18	25	5	12	19	26	6	13	20	27	4/54
5	11	22	6	17	1	12	23	7	18	2	13	24	8	19	3	14	25	9	20	4	15	26	10	21	5	16	27	5/54
6	0	0	5	0	0	1	0	0	6	0	0	2	0	0	7	0	0	3	0	0	8	0	0	4	0	0	9	6/54
7	4	8	12	16	20	24	1	5	9	13	17	21	25	2	6	10	14	18	22	26	3	7	11	15	19	23	27	7/54
8	17	7	24	14	4	21	11	1	18	8	25	15	5	22	12	2	19	9	26	16	6	23	13	3	20	10	27	8/54
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9/54
10	19	11	3	22	14	6	25	17	9	1	20	12	4	23	15	7	26	18	10	2	21	13	5	24	16	8	27	10/54
11	5	10	15	20	25	3	8	13	18	23	1	6	11	16	21	26	4	9	14	19	24	2	7	12	17	22	27	11/54
12	0	0	7	0	0	5	0	0	3	0	0	1	0	0	8	0	0	6	0	0	4	0	0	2	0	0	9	12/54
13	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	27	13/54

Tablica 27/1



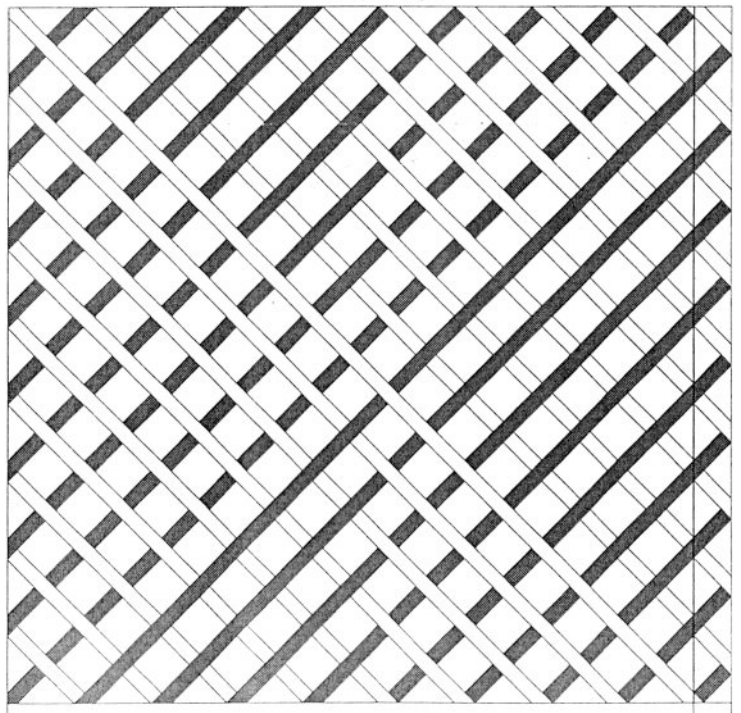
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/2



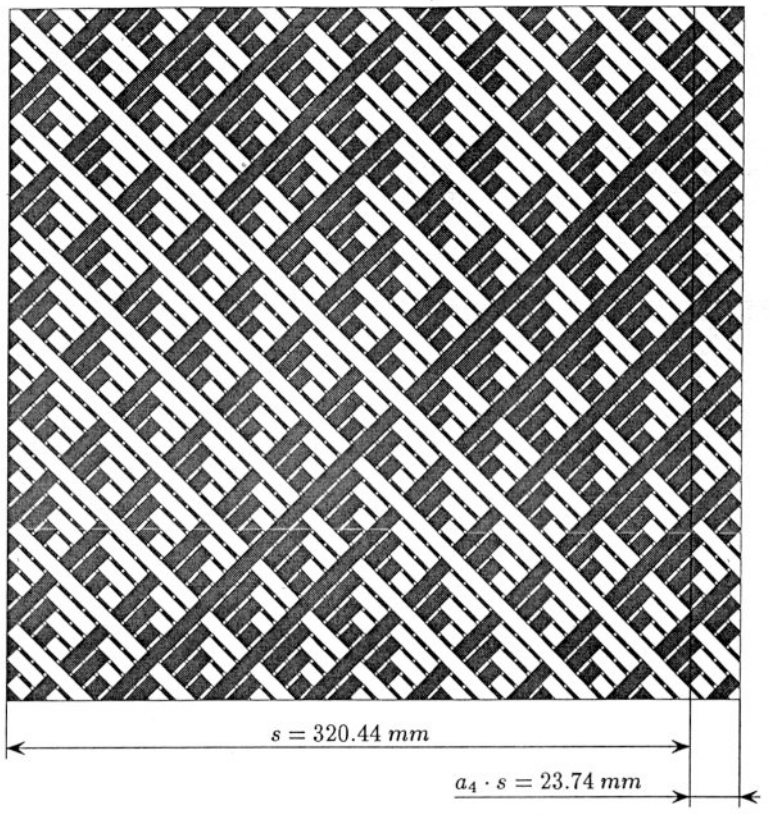
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/3



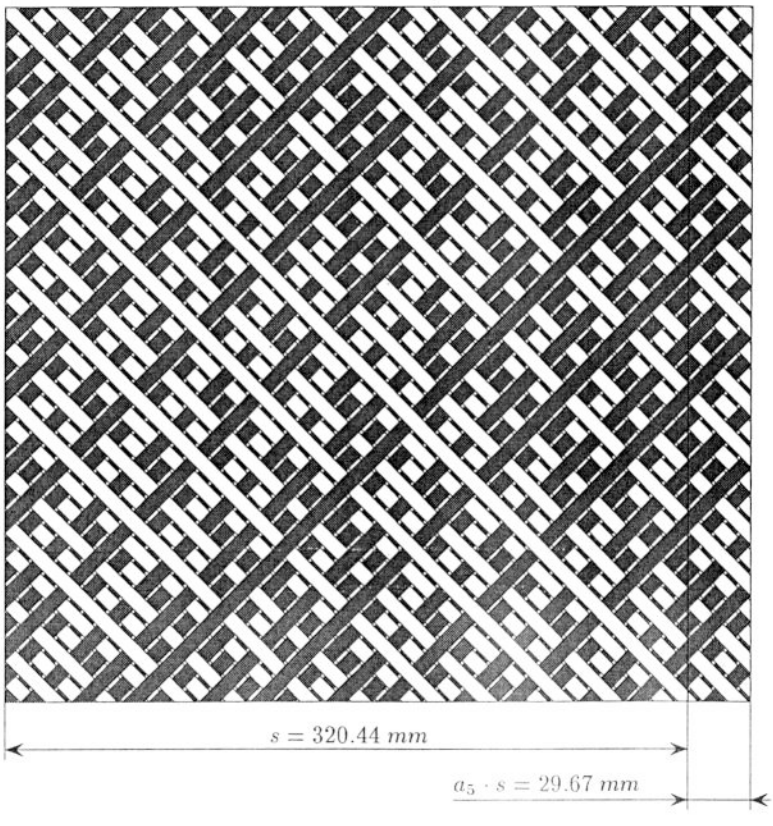
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/4



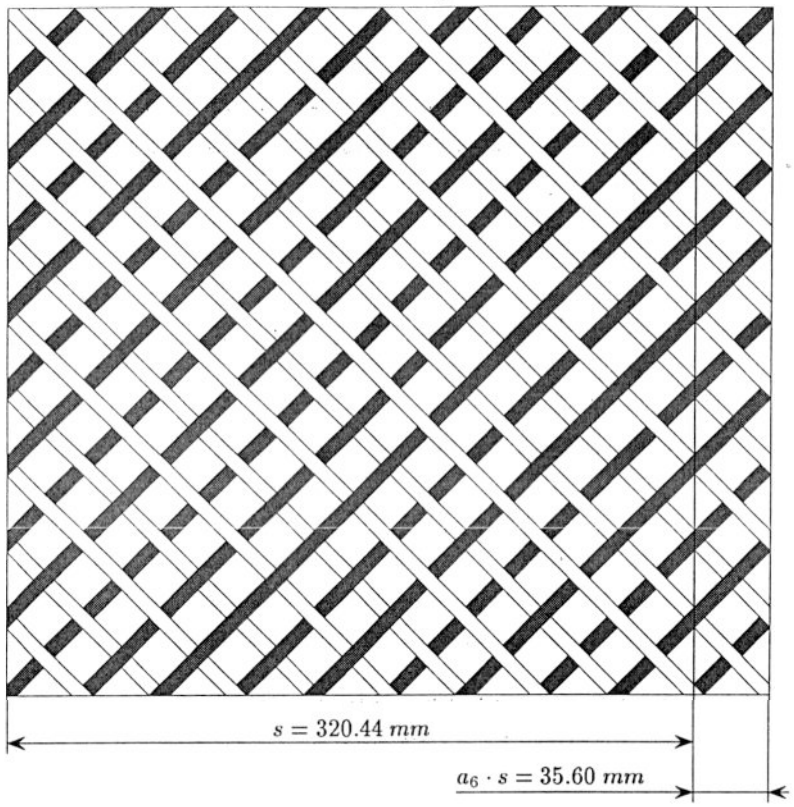
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/5



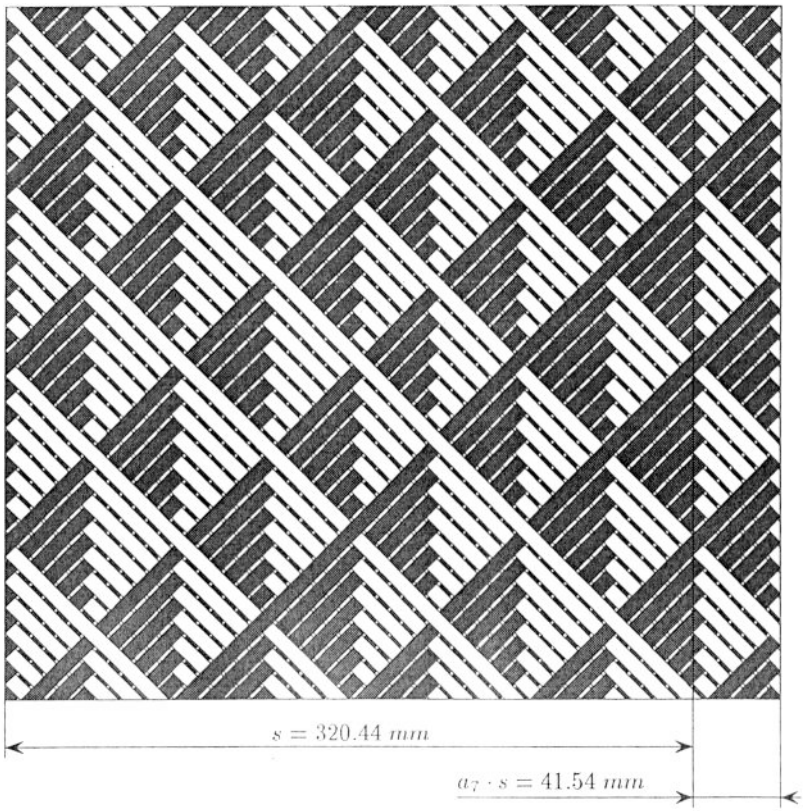
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/6



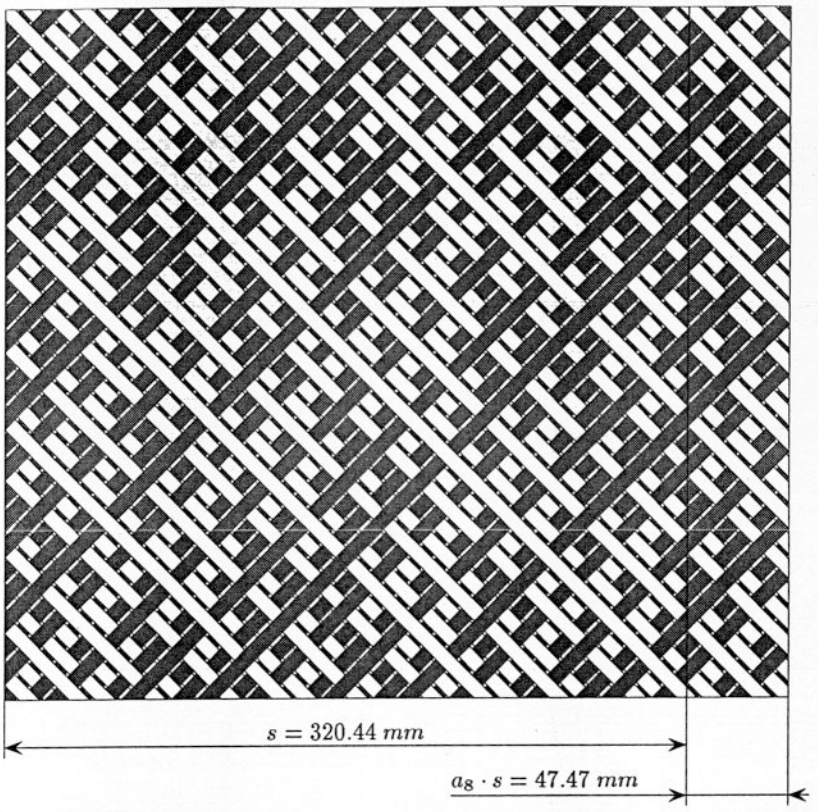
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/7



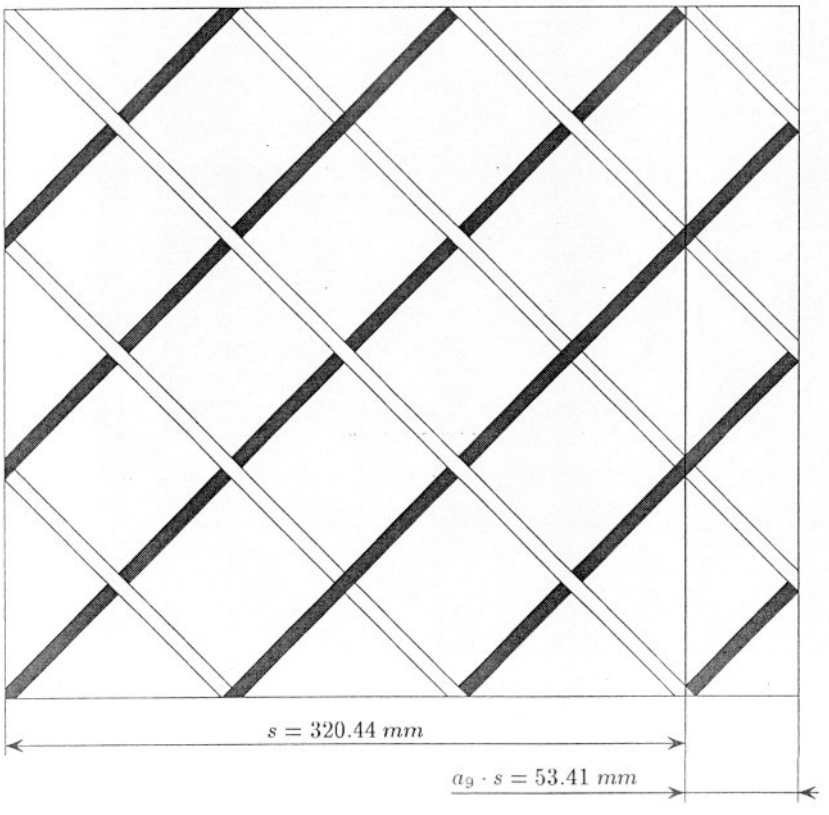
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/8



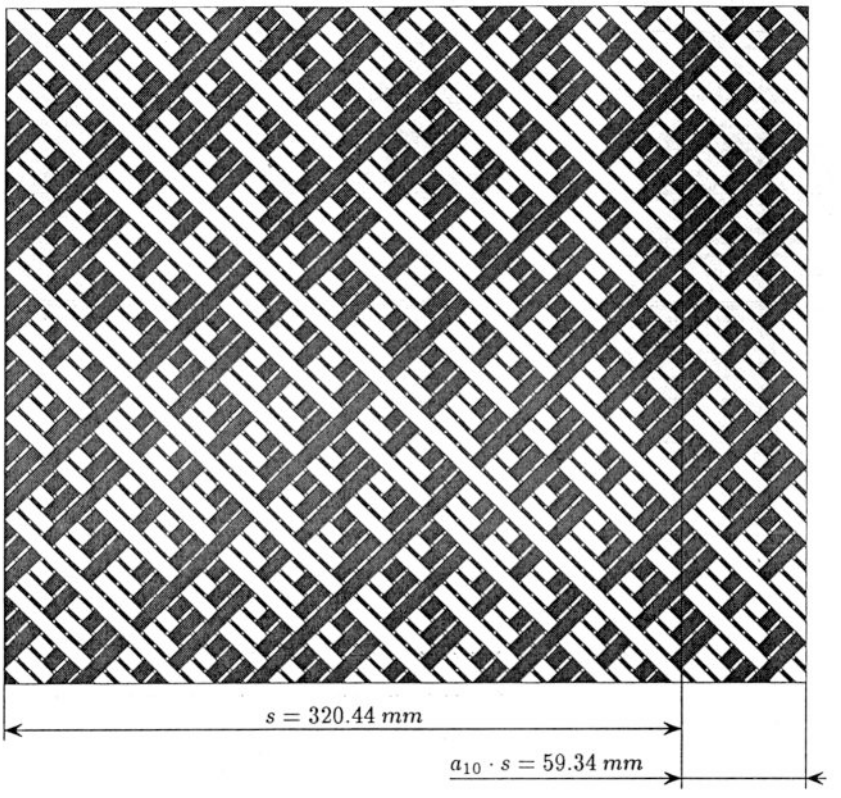
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/9



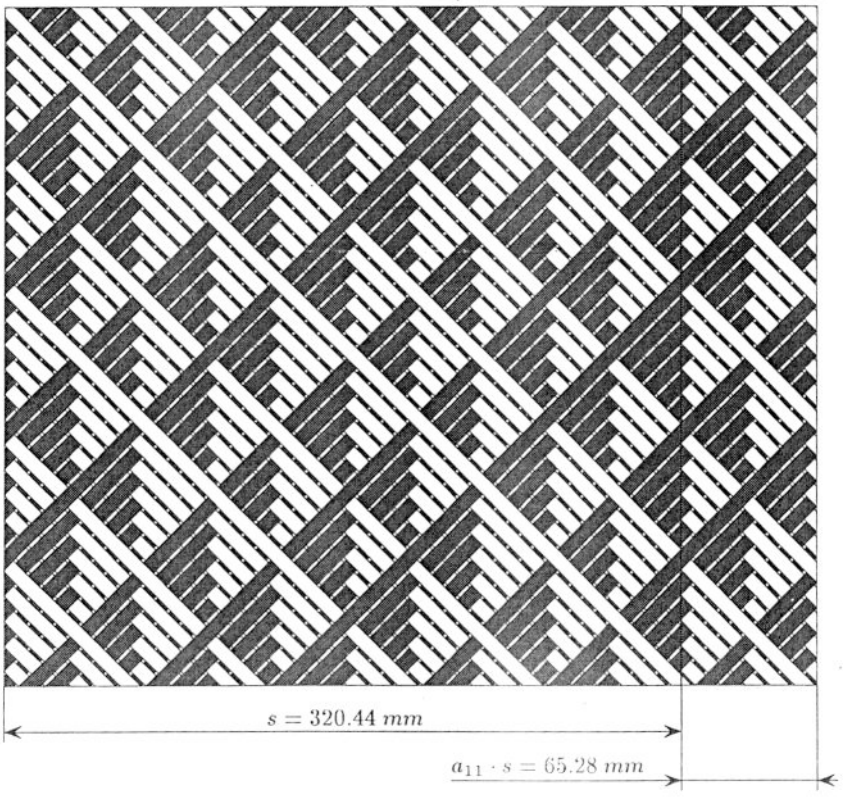
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/10



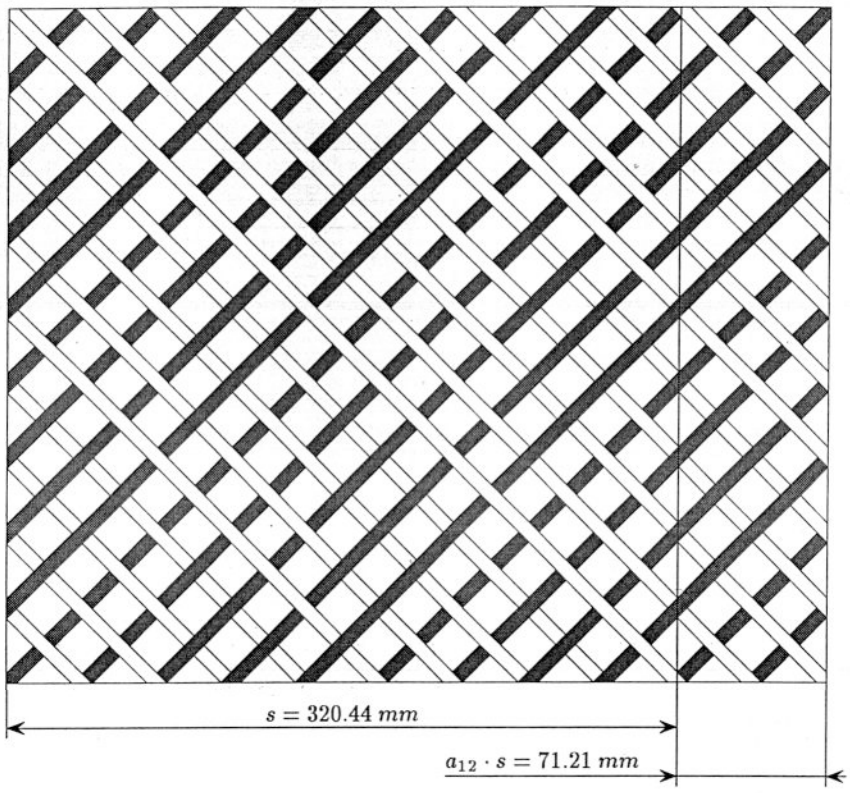
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/11



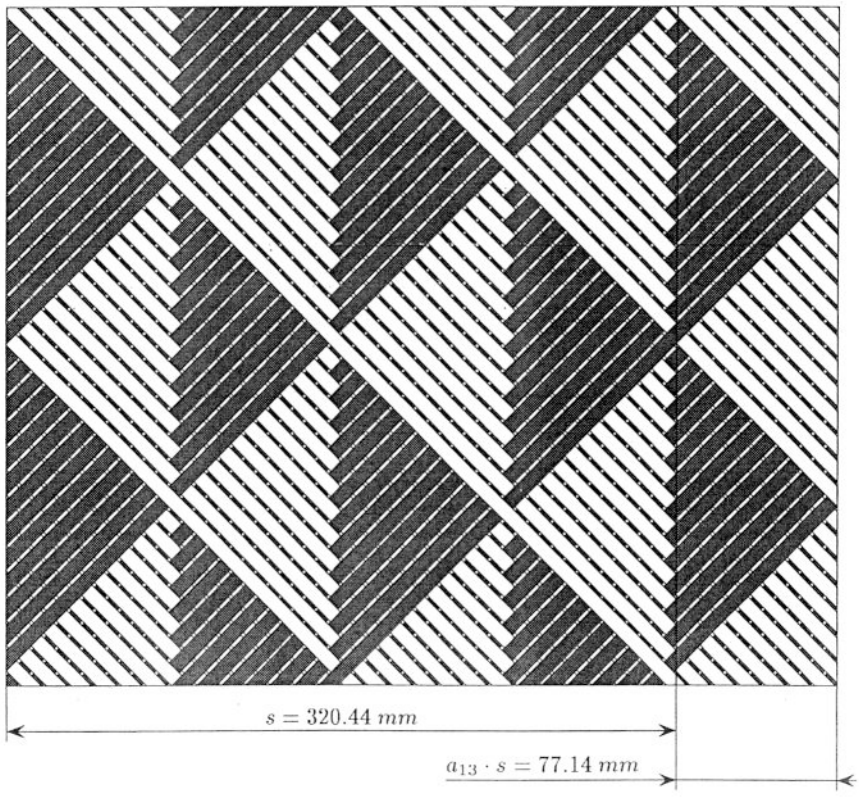
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 27/12



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

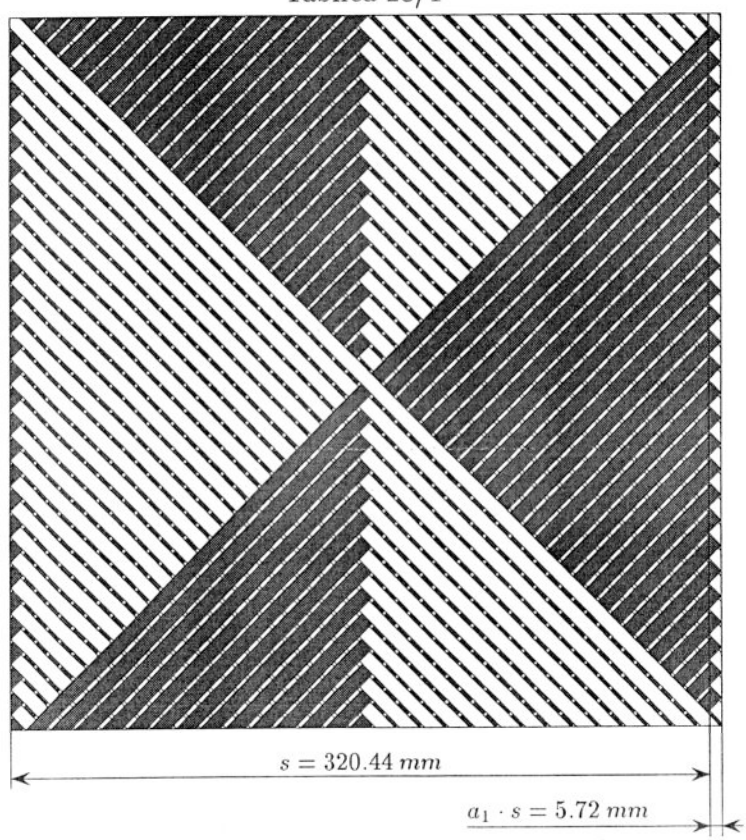
Tablica 27/13



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

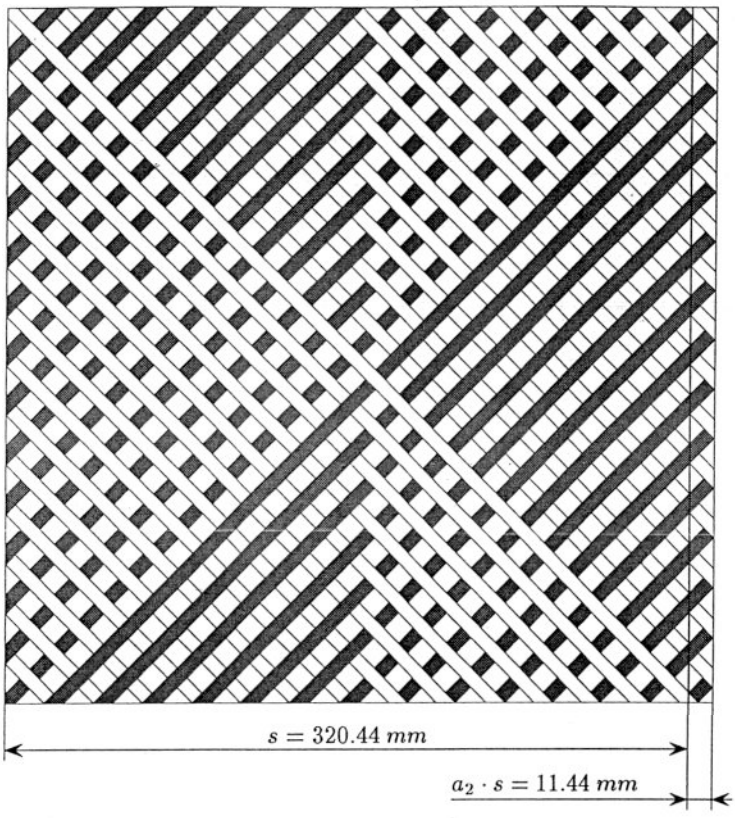
Liczba wiązek rowingu: 28																												$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																											$= Nr/(2 \cdot 28)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	1/56
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	2/56
3	19	10	1	20	11	2	21	12	3	22	13	4	23	14	5	24	15	6	25	16	7	26	17	8	27	18	9	28	3/56
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0	5	0	0	0	6	0	0	0	7	4/56
5	17	6	23	12	1	18	7	24	13	2	19	8	25	14	3	20	9	26	15	4	21	10	27	16	5	22	11	28	5/56
6	0	5	0	10	0	1	0	6	0	11	0	2	0	7	0	12	0	3	0	8	0	13	0	4	0	9	0	14	6/56
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	4	7/56
8	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	0	2	0	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0	7	8/56
9	25	22	19	16	13	10	7	4	1	26	23	20	17	14	11	8	5	2	27	24	21	18	15	12	9	6	3	28	9/56
10	0	3	0	6	0	9	0	12	0	1	0	4	0	7	0	10	0	13	0	2	0	5	0	8	0	11	0	14	10/56
11	23	18	13	8	3	26	21	16	11	6	1	24	19	14	9	4	27	22	17	12	7	2	25	20	15	10	5	28	11/56
12	0	0	0	5	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	6	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0	0	7	12/56
13	13	26	11	24	9	22	7	20	5	18	3	16	1	14	27	12	25	10	23	8	21	6	19	4	17	2	15	28	13/56
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	14/56

Tablica 28/1



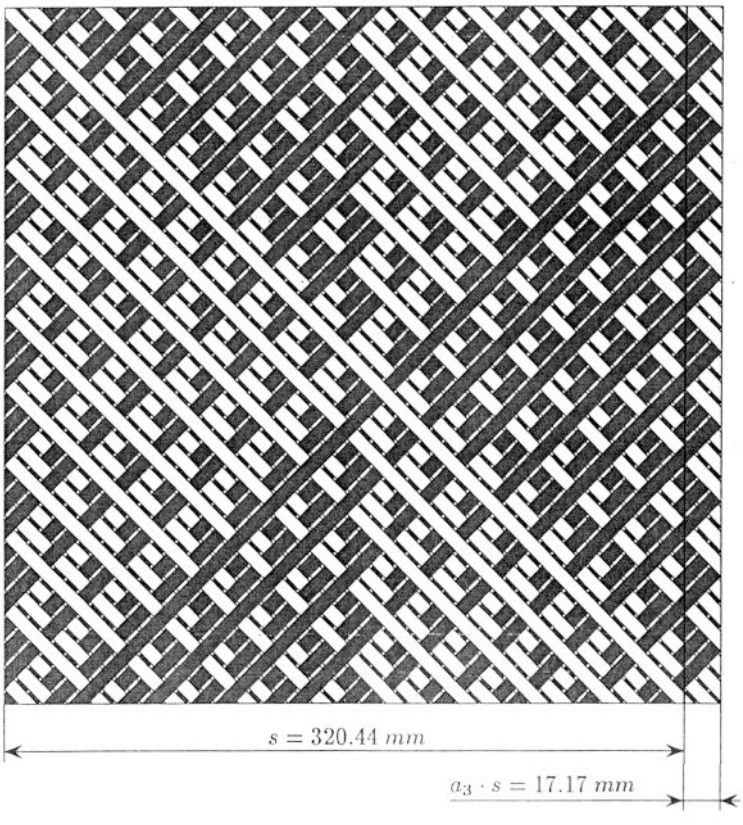
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/2



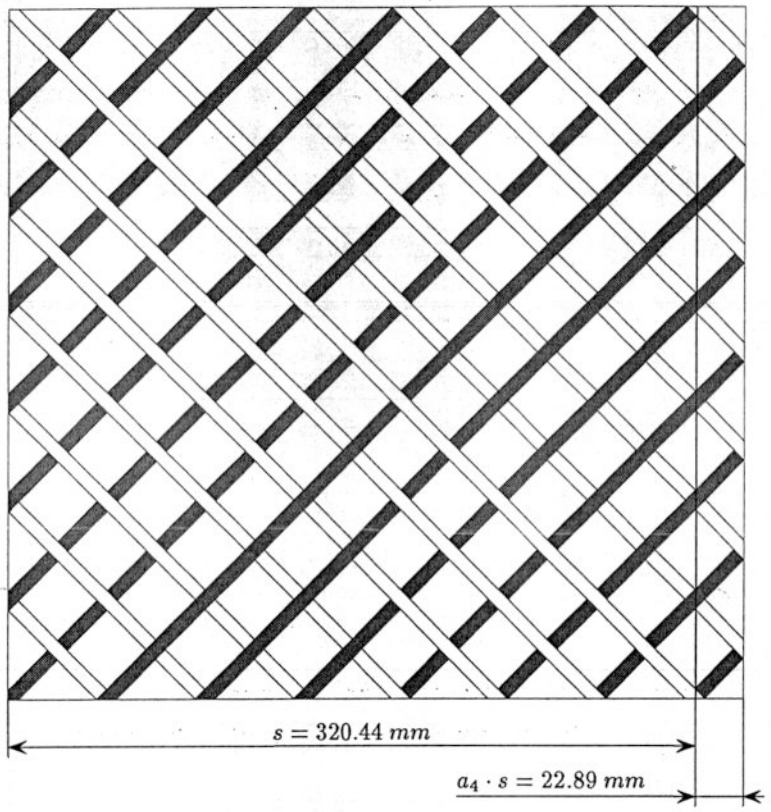
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/3



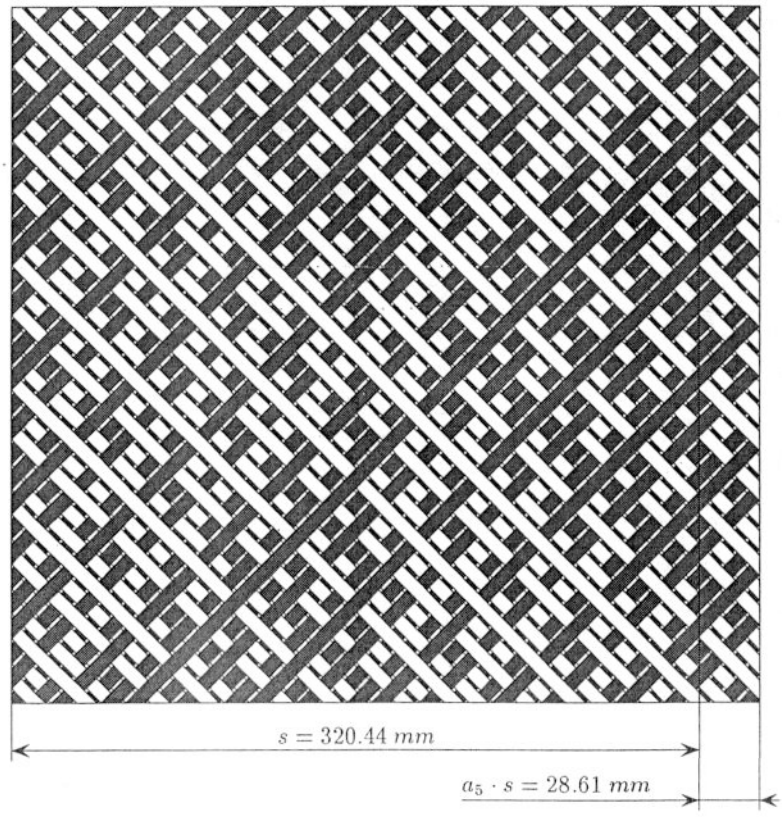
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/4



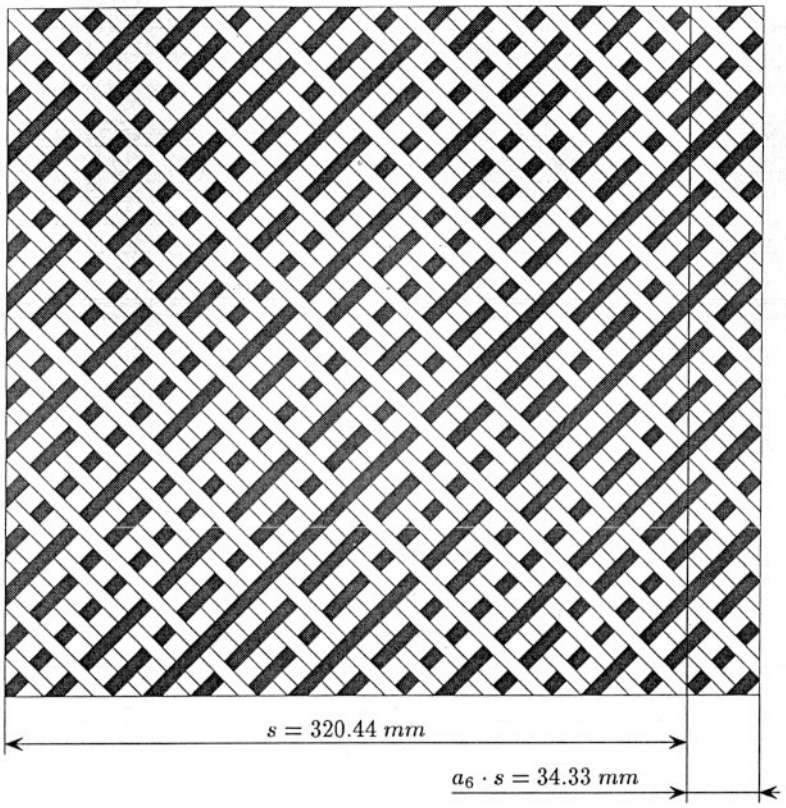
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{\circ}$

Tablica 28/5



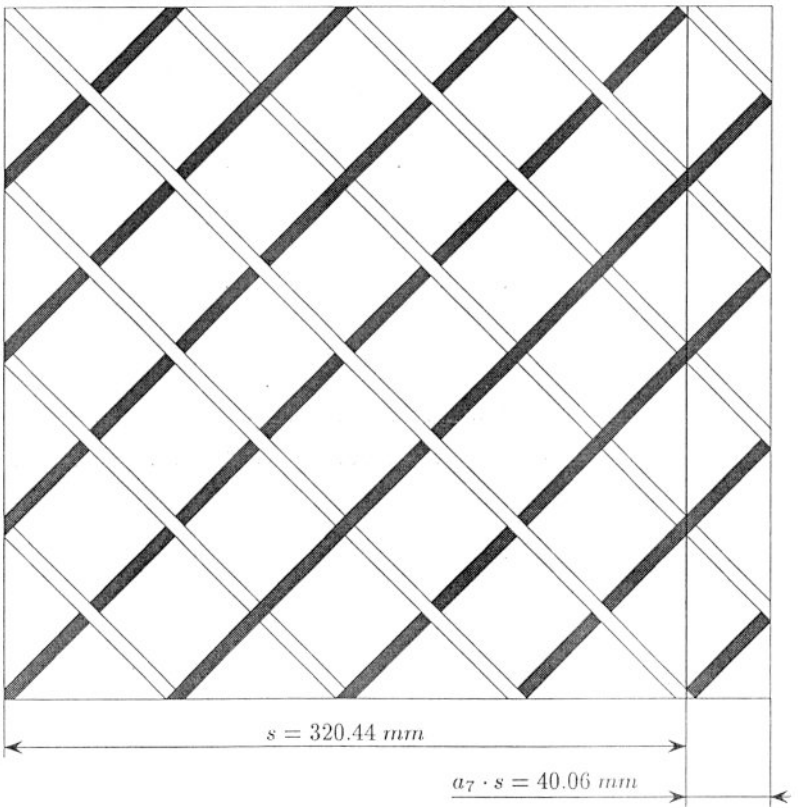
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{\circ}$

Tablica 28/6



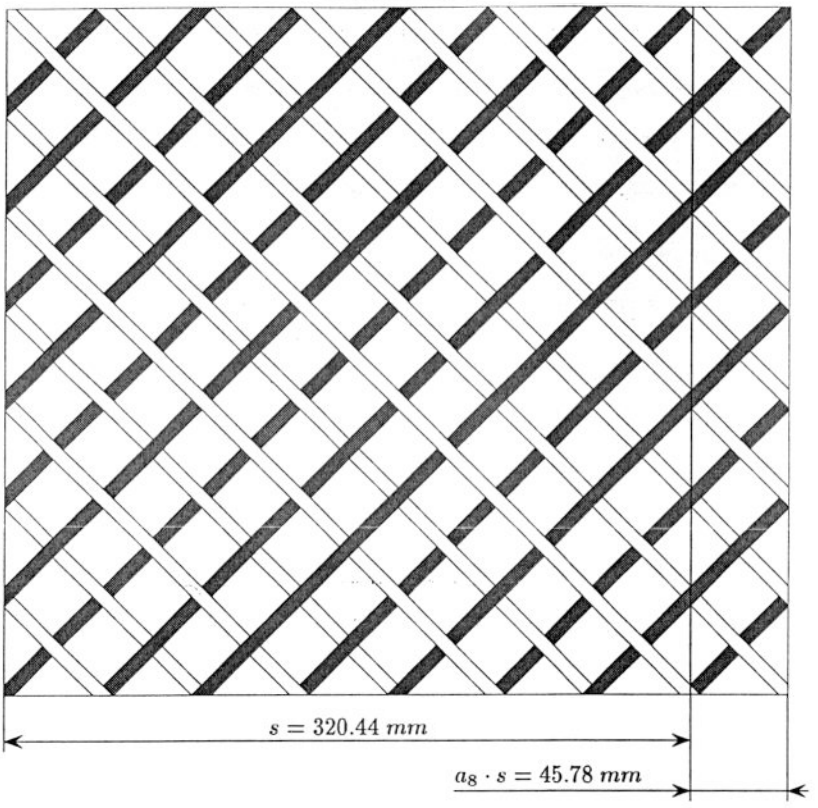
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/7



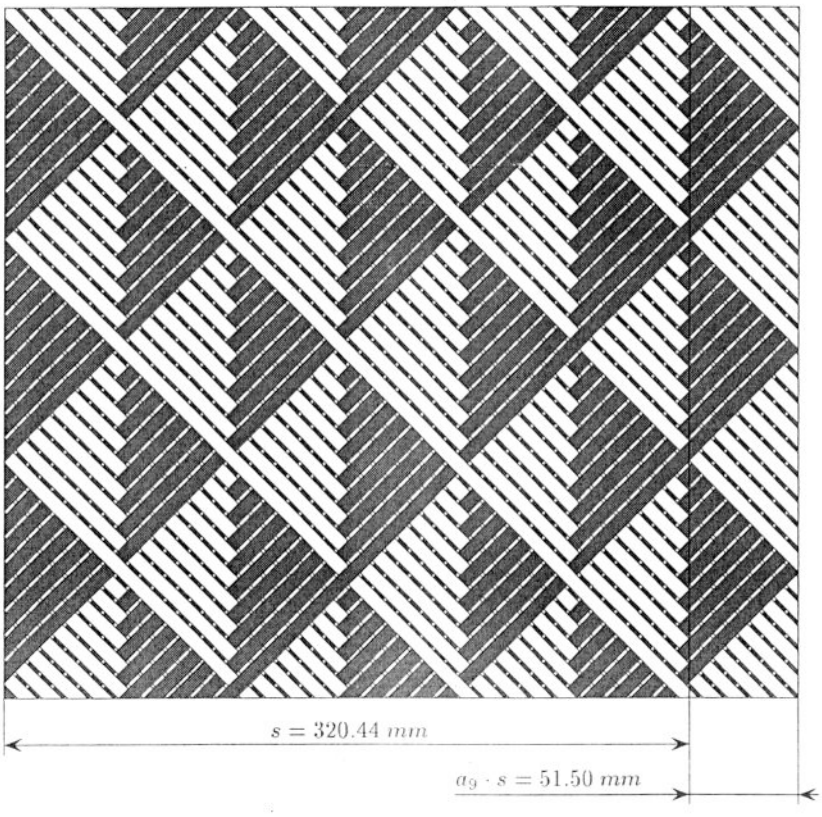
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/8



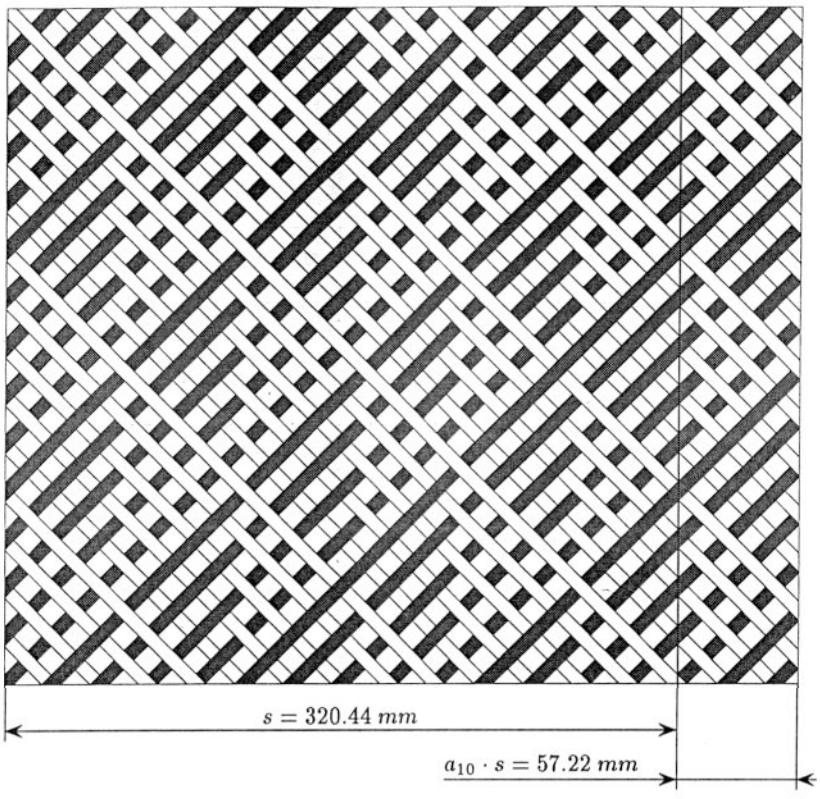
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/9



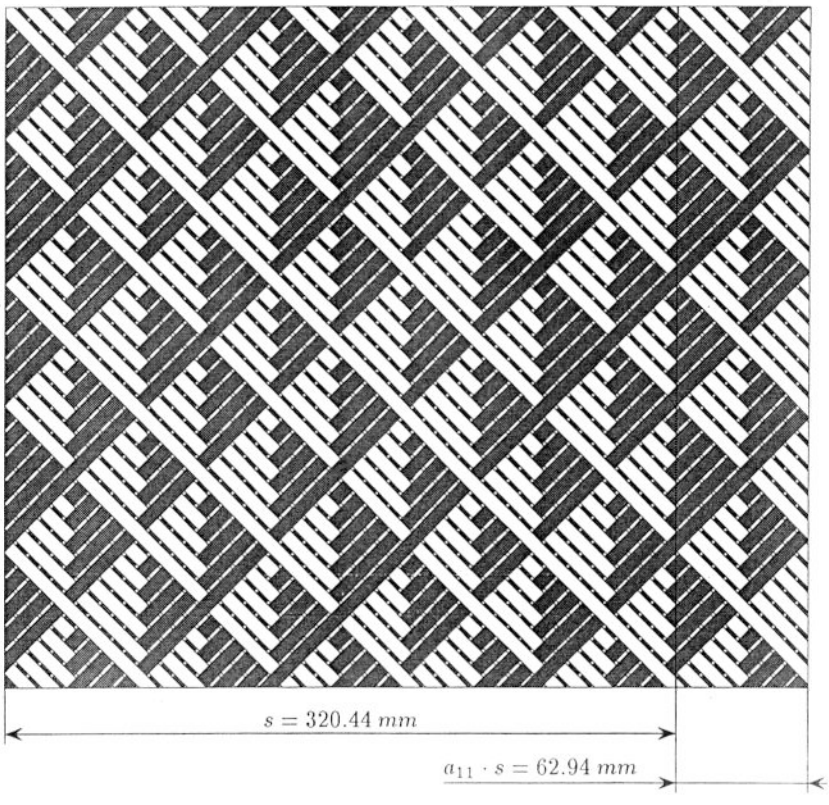
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/10



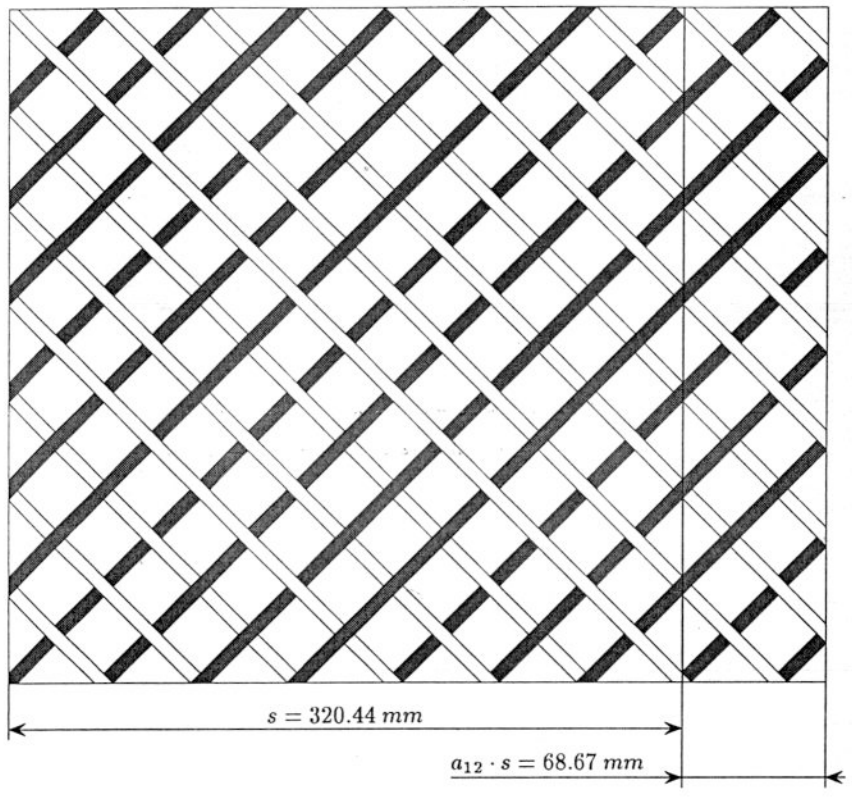
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/11



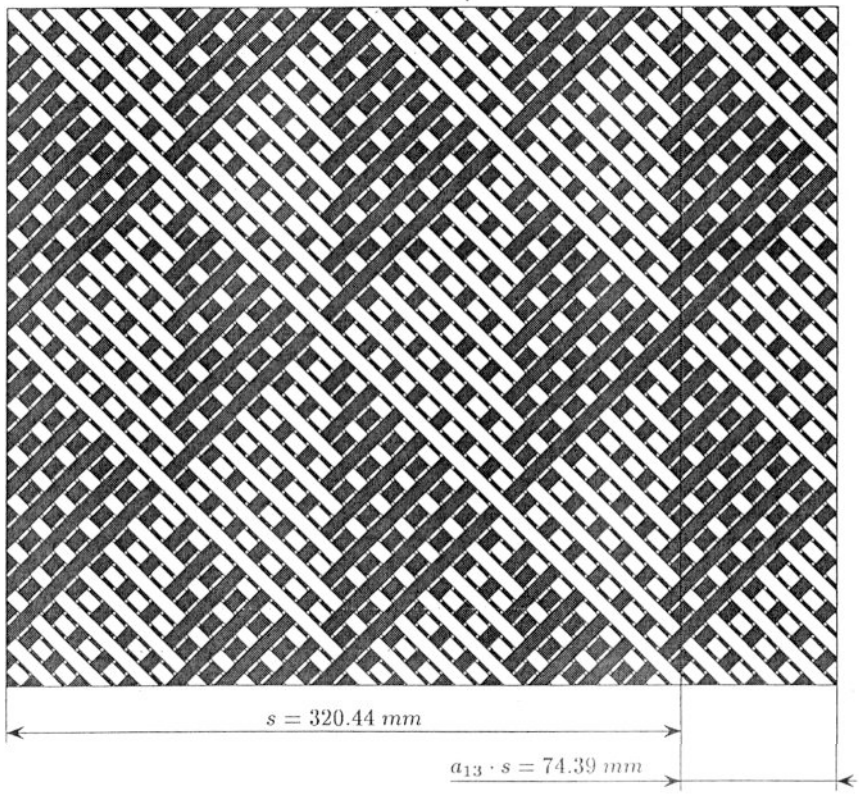
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/12



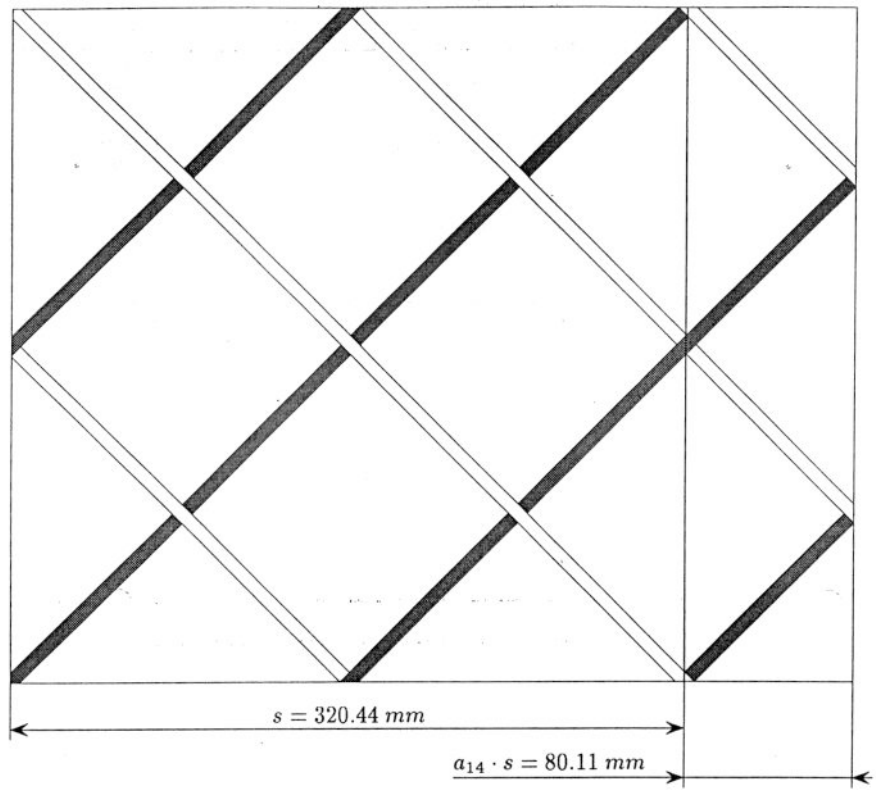
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 28/13



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

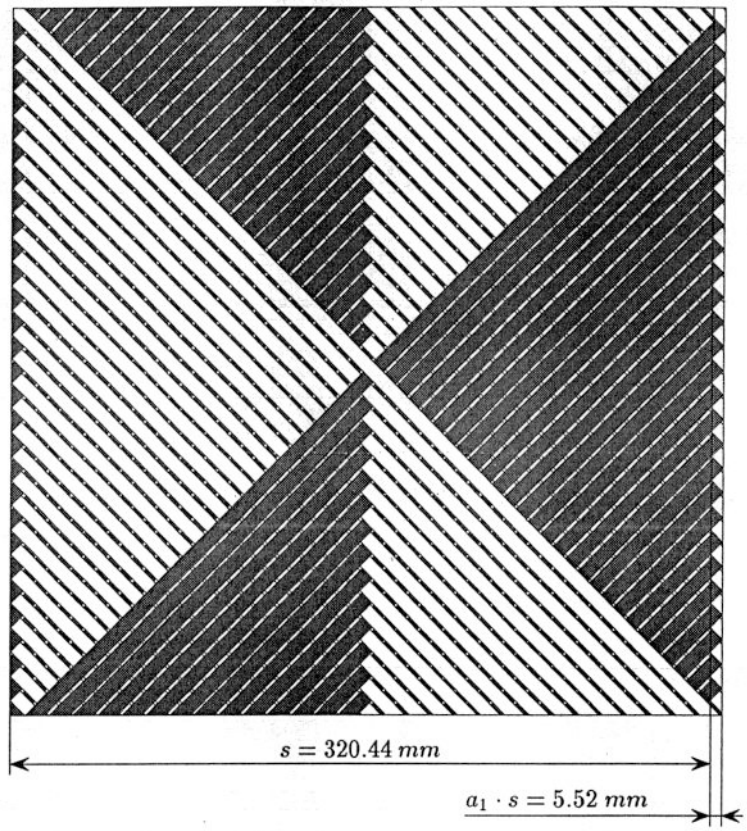
Tablica 28/14



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

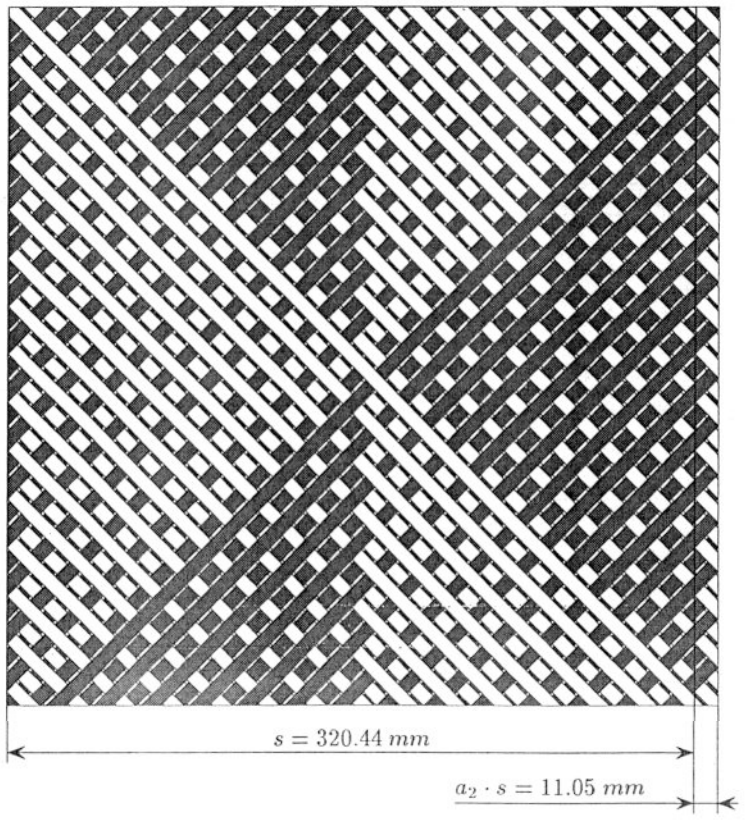
Liczba wiązek rowingu: 29																													$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow$																												$= Nr/(2 \cdot 29)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	1/58
2	15	1	16	2	17	3	18	4	19	5	20	6	21	7	22	8	23	9	24	10	25	11	26	12	27	13	28	14	29	2/58
3	10	20	1	11	21	2	12	22	3	13	23	4	14	24	5	15	25	6	16	26	7	17	27	8	18	28	9	19	29	3/58
4	22	15	8	1	23	16	9	2	24	17	10	3	25	18	11	4	26	19	12	5	27	20	13	6	28	21	14	7	29	4/58
5	6	12	18	24	1	7	13	19	25	2	8	14	20	26	3	9	15	21	27	4	10	16	22	28	5	11	17	23	29	5/58
6	5	10	15	20	25	1	6	11	16	21	26	2	7	12	17	22	27	3	8	13	18	23	28	4	9	14	19	24	29	6/58
7	25	21	17	13	9	5	1	26	22	18	14	10	6	2	27	23	19	15	11	7	3	28	24	20	16	12	8	4	29	7/58
8	11	22	4	15	26	8	19	1	12	23	5	16	27	9	20	2	13	24	6	17	28	10	21	3	14	25	7	18	29	8/58
9	13	26	10	23	7	20	4	17	1	14	27	11	24	8	21	5	18	2	15	28	12	25	9	22	6	19	3	16	29	9/58
10	3	6	9	12	15	18	21	24	27	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	10/58
11	8	16	24	3	11	19	27	6	14	22	1	9	17	25	4	12	20	28	7	15	23	2	10	18	26	5	13	21	29	11/58
12	17	5	22	10	27	15	3	20	8	25	13	1	18	6	23	11	28	16	4	21	9	26	14	2	19	7	24	12	29	12/58
13	9	18	27	7	16	25	5	14	23	3	12	21	1	10	19	28	8	17	26	6	15	24	4	13	22	2	11	20	29	13/58
14	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	29	14/58

Tablica 29/1



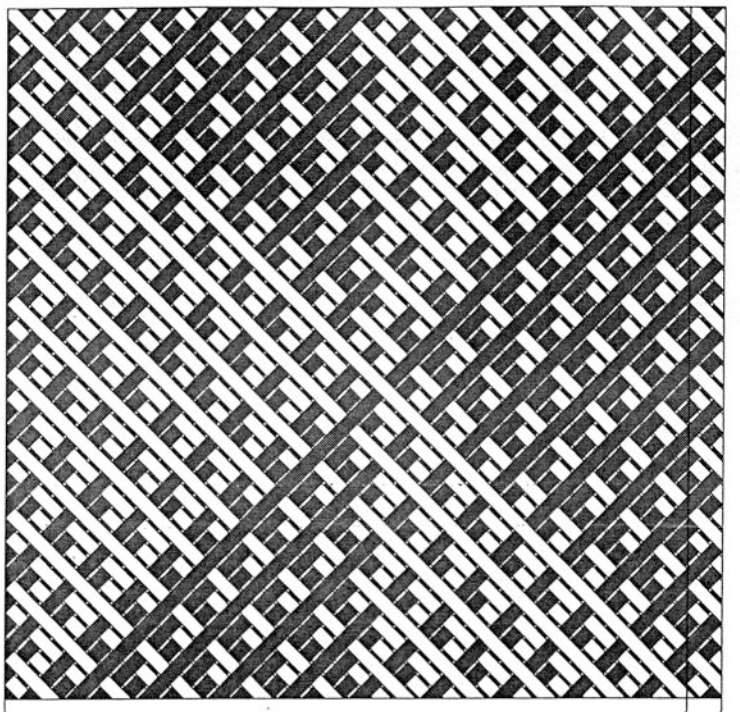
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/2



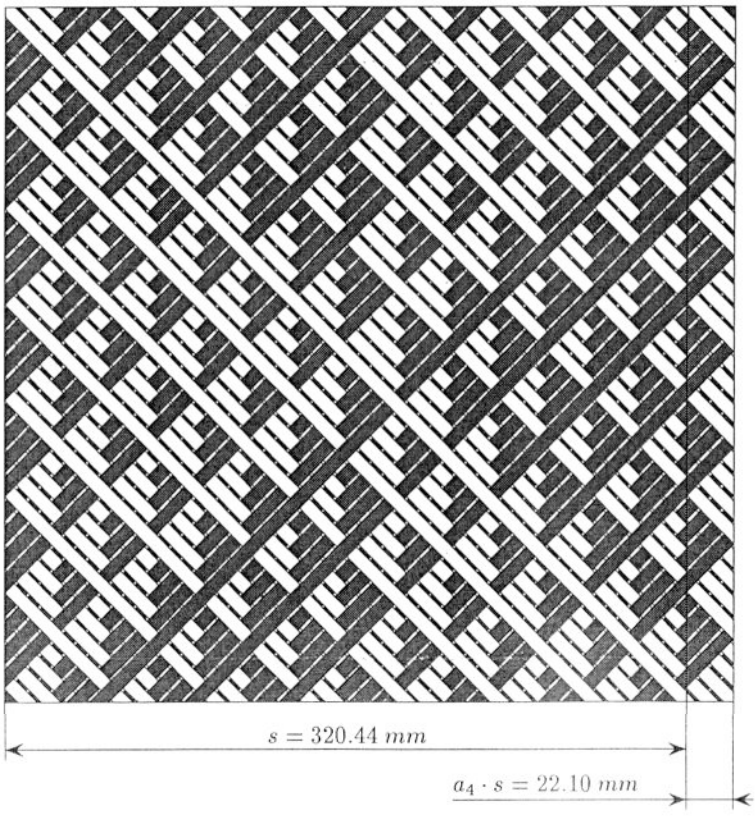
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/3



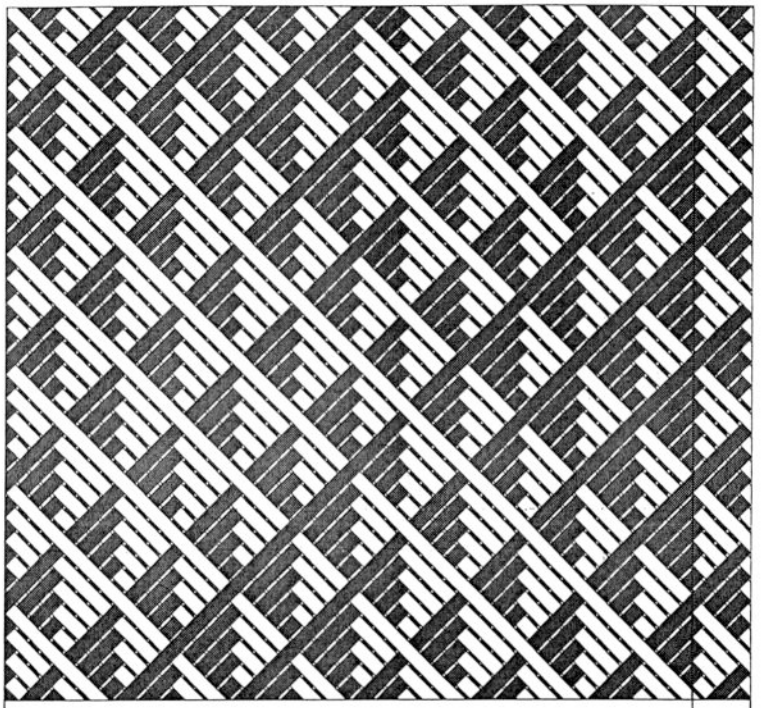
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/4



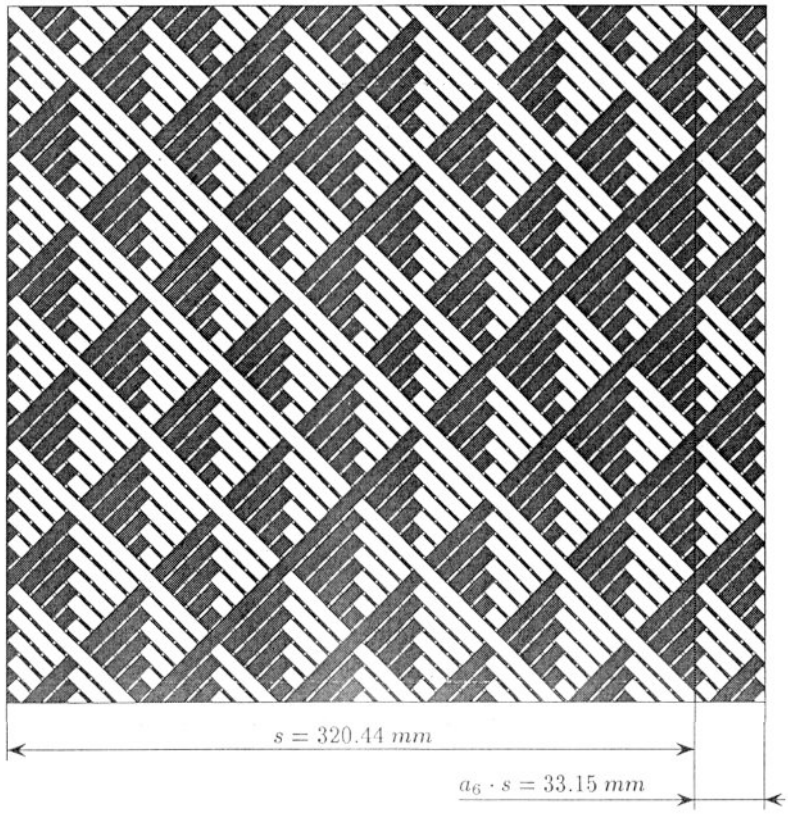
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/5



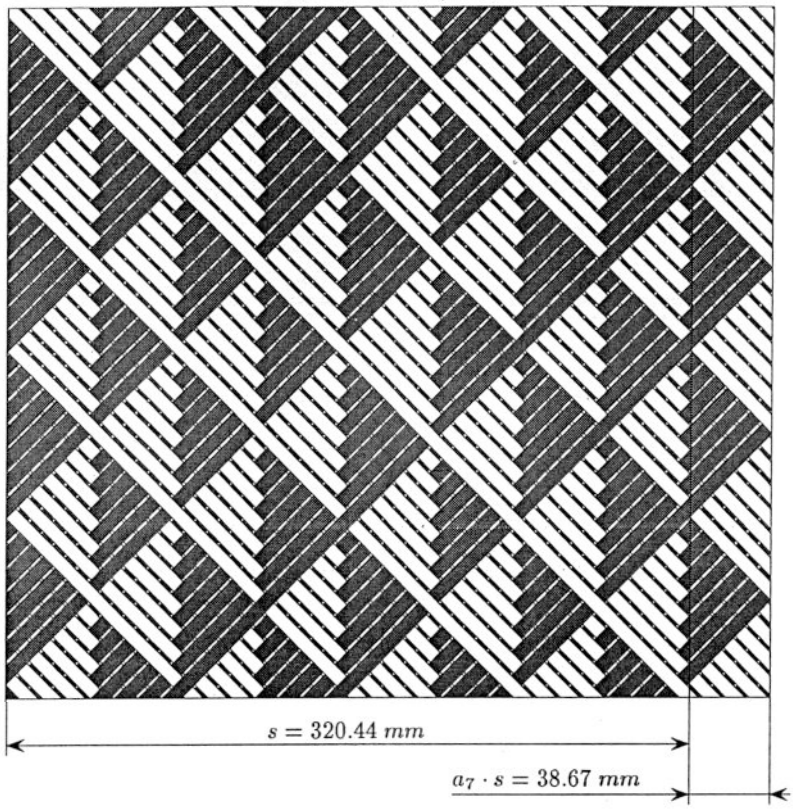
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 29/6



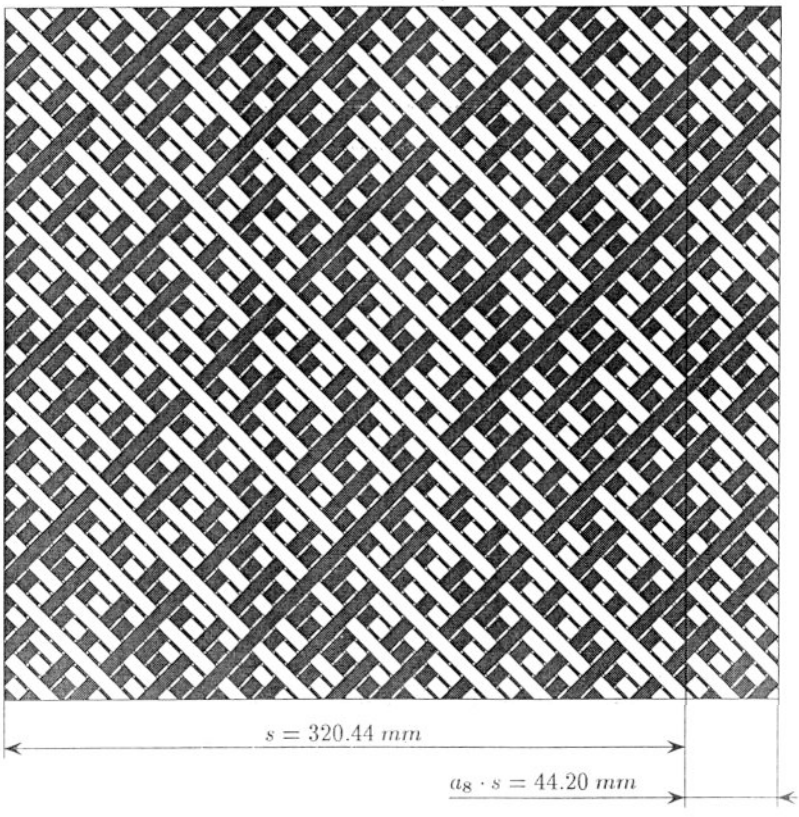
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 29/7



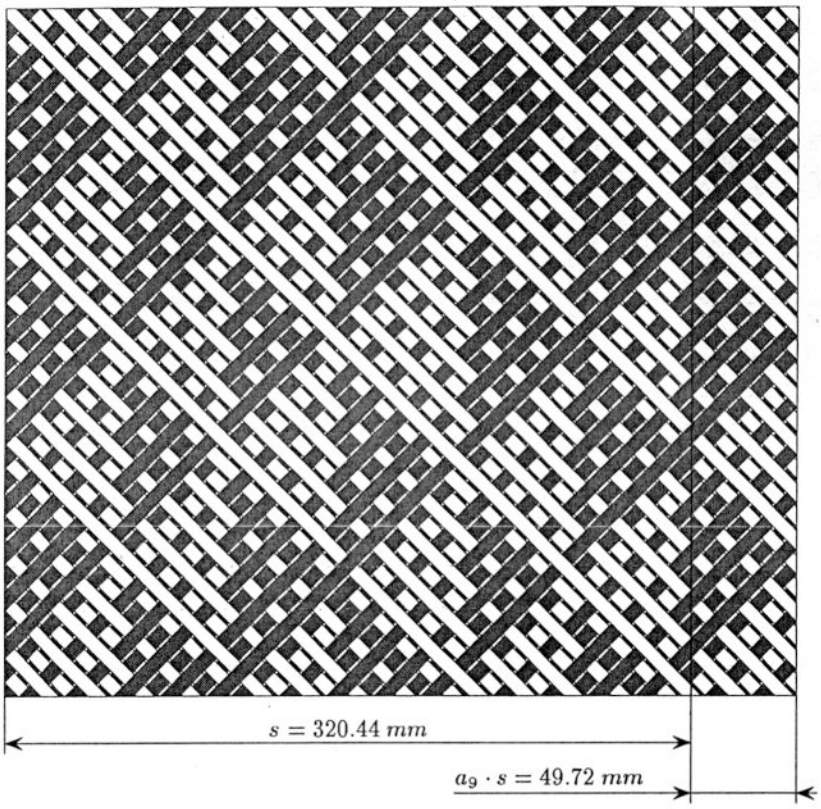
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/8



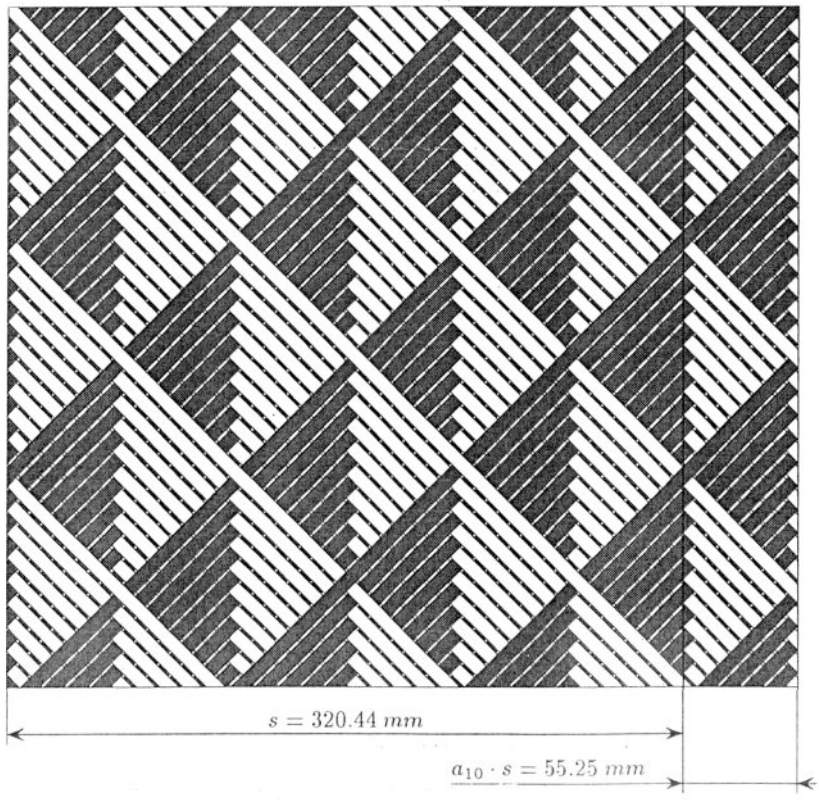
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/9



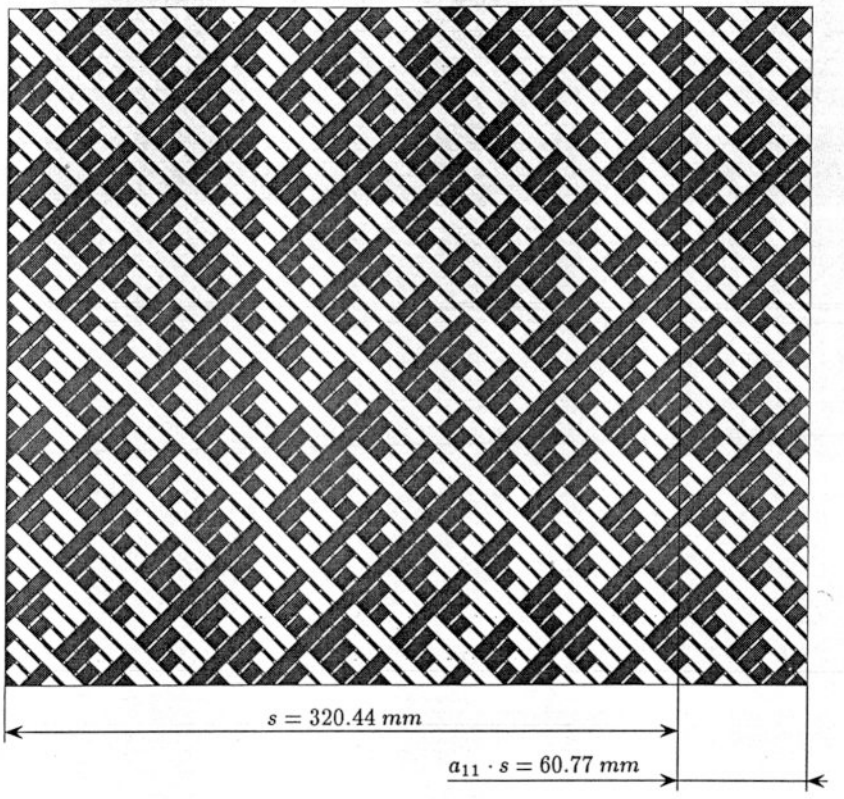
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/10



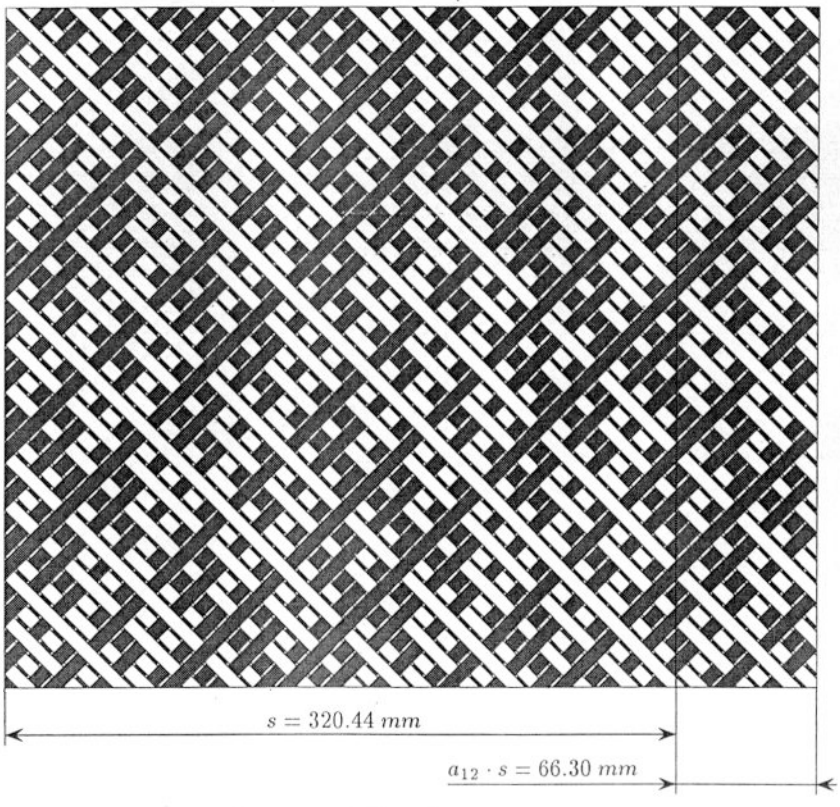
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/11



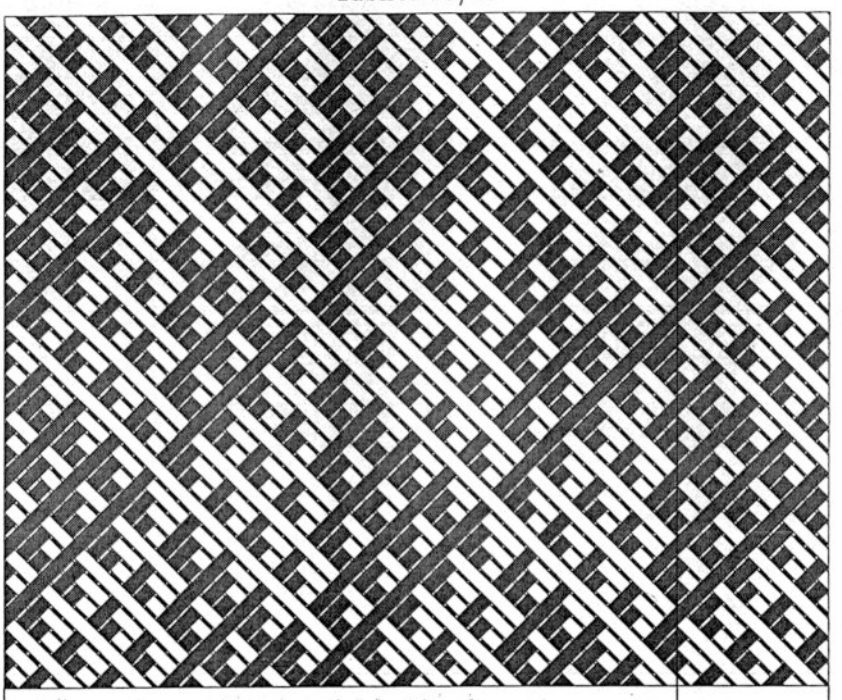
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/12



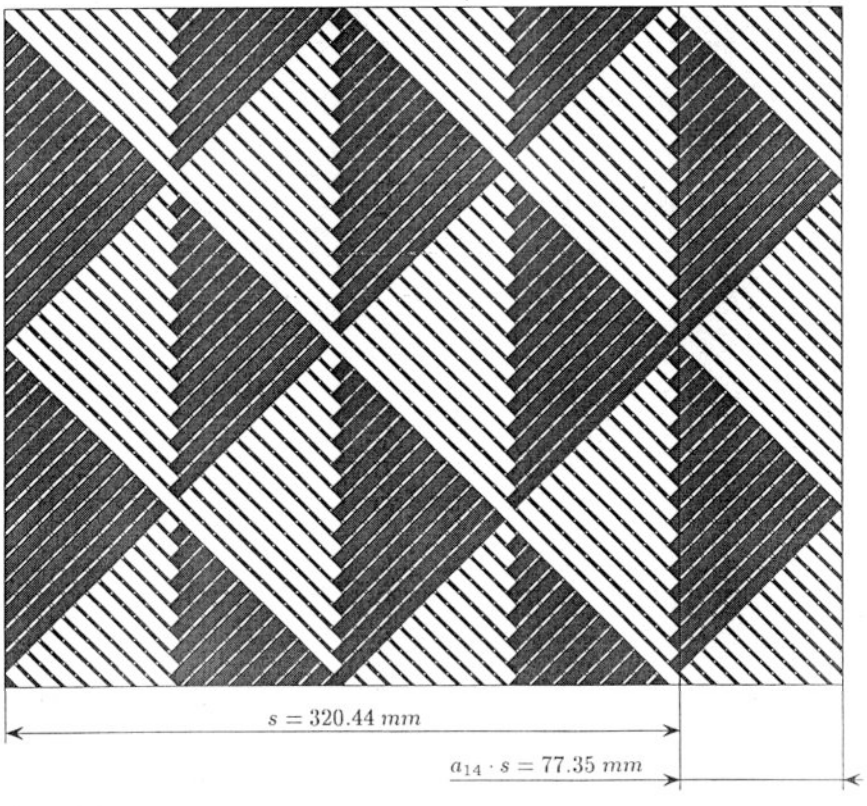
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 29/13



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

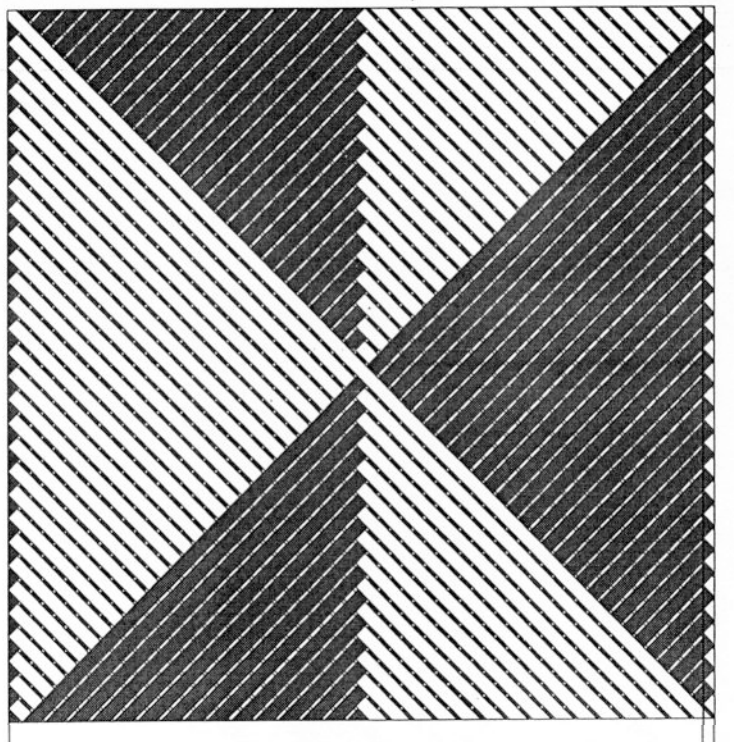
Tablica 29/14



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

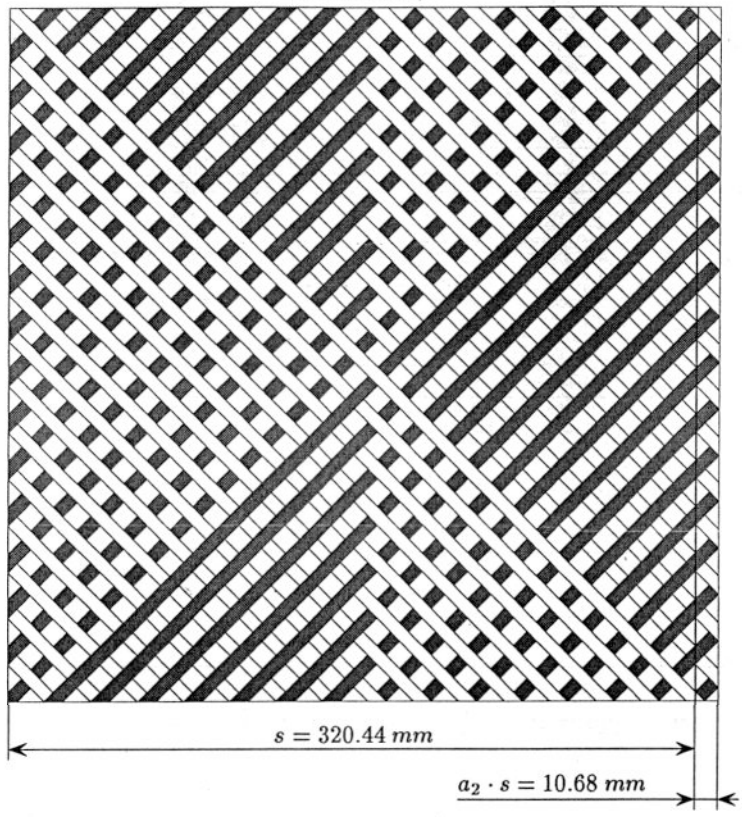
Liczba wiązek rowingu: 30																															$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow$														$\pi \cdot d$																$\rightarrow$	$= Nr/(2 \cdot 30)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1/60
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	2/60
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	0	0	9	0	0	10	3/60
4	0	8	0	1	0	9	0	2	0	10	0	3	0	11	0	4	0	12	0	5	0	13	0	6	0	14	0	7	0	15	4/60
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	5	0	0	0	0	6	5/60
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	6/60
7	13	26	9	22	5	18	1	14	27	10	23	6	19	2	15	28	11	24	7	20	3	16	29	12	25	8	21	4	17	30	7/60
8	0	4	0	8	0	12	0	1	0	5	0	9	0	13	0	2	0	6	0	10	0	14	0	3	0	7	0	11	0	15	8/60
9	0	0	7	0	0	4	0	0	1	0	0	8	0	0	5	0	0	2	0	0	9	0	0	6	0	0	3	0	0	10	9/60
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10/60
11	11	22	3	14	25	6	17	28	9	20	1	12	23	4	15	26	7	18	29	10	21	2	13	24	5	16	27	8	19	30	11/60
12	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	5	12/60
13	7	14	21	28	5	12	19	26	3	10	17	24	1	8	15	22	29	6	13	20	27	4	11	18	25	2	9	16	23	30	13/60
14	0	13	0	11	0	9	0	7	0	5	0	3	0	1	0	14	0	12	0	10	0	8	0	6	0	4	0	2	0	15	14/60
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	15/60

Tablica 30/1



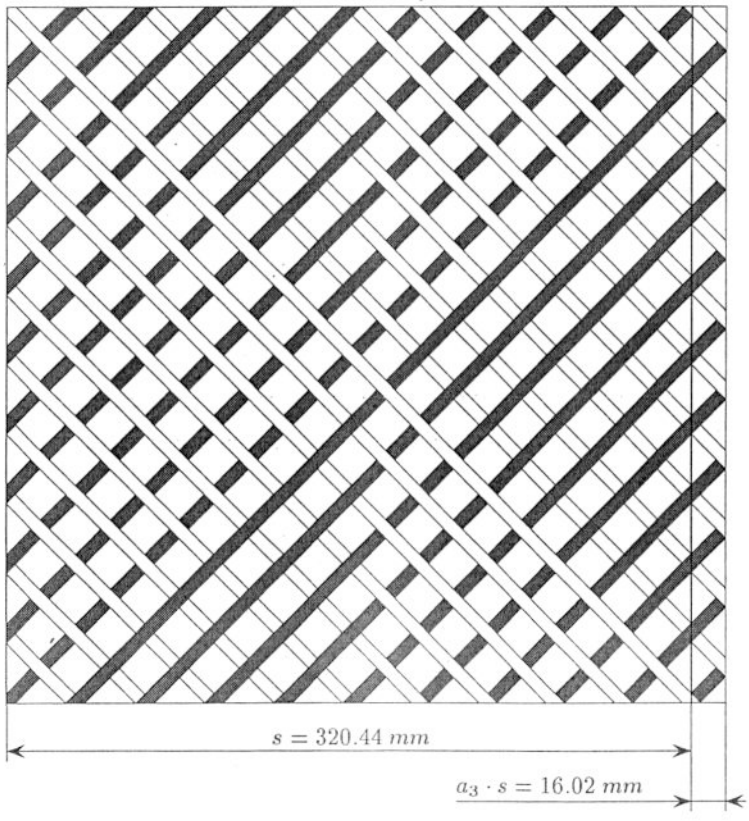
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/2



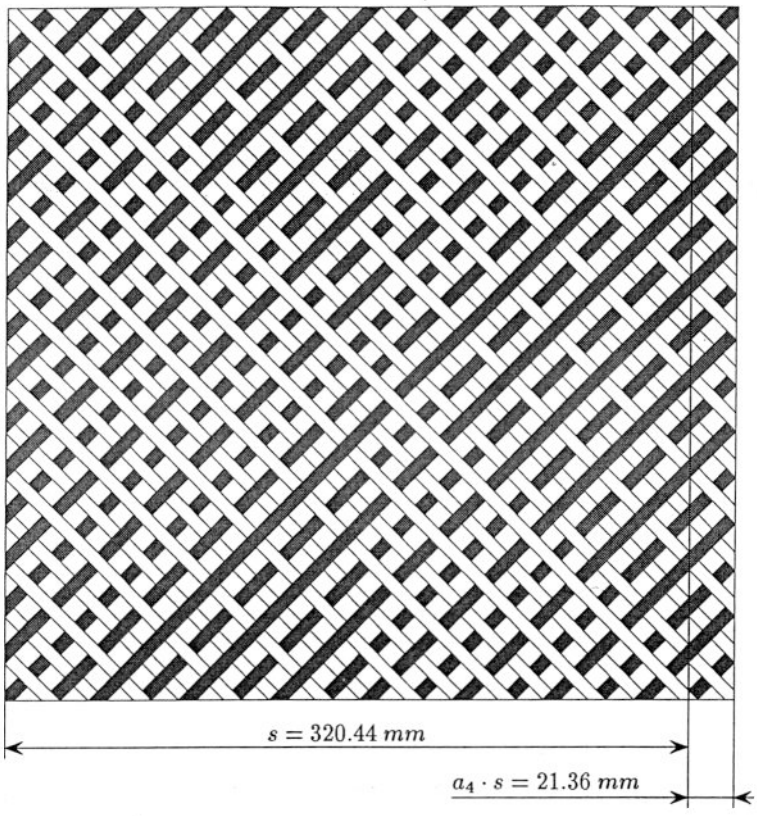
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/3



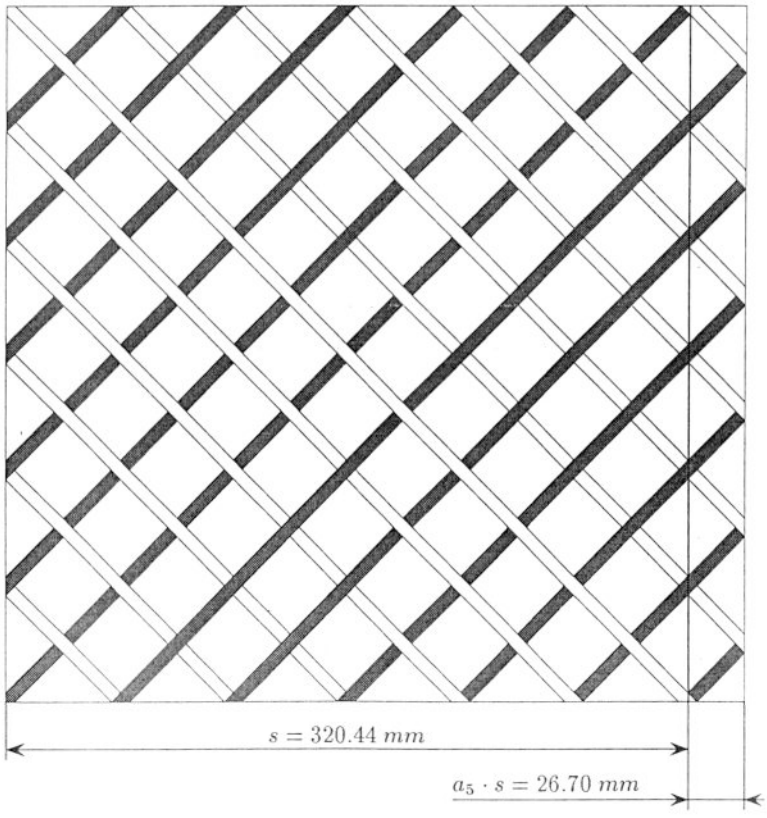
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/4



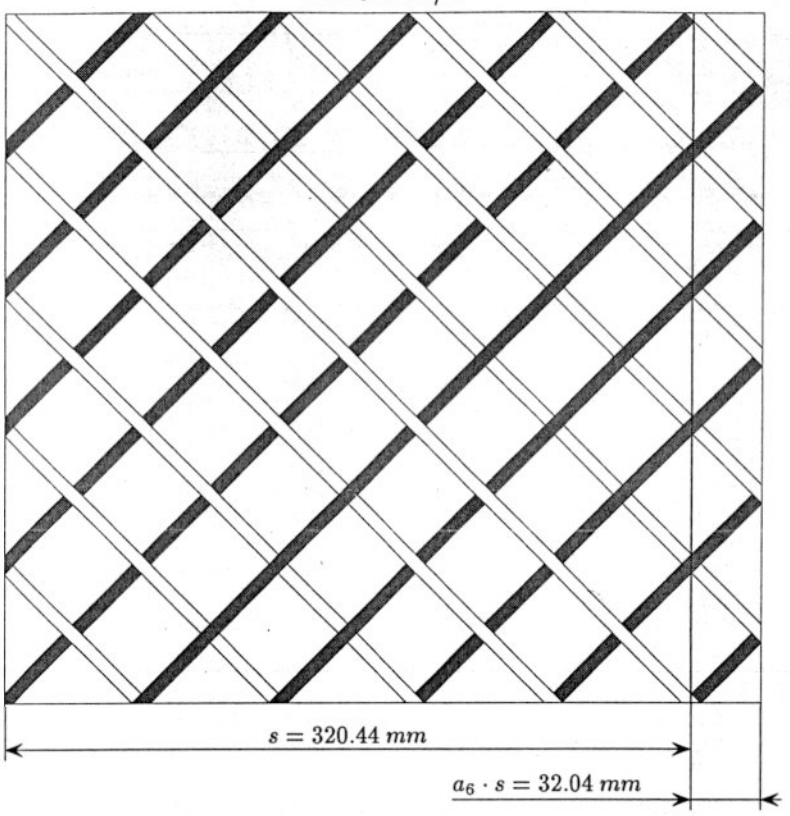
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 30/5



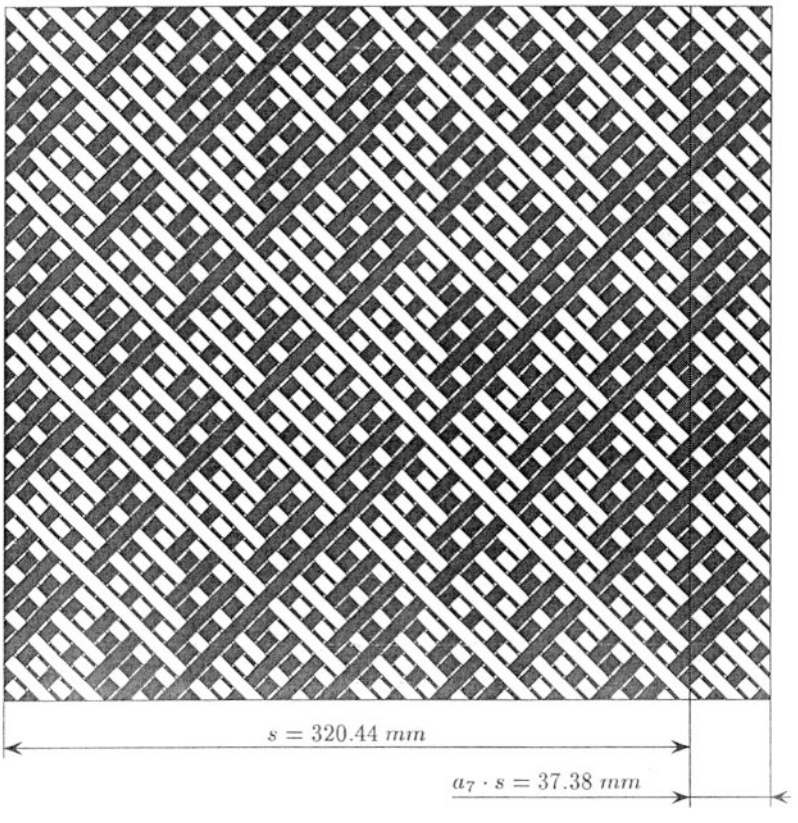
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 30/6



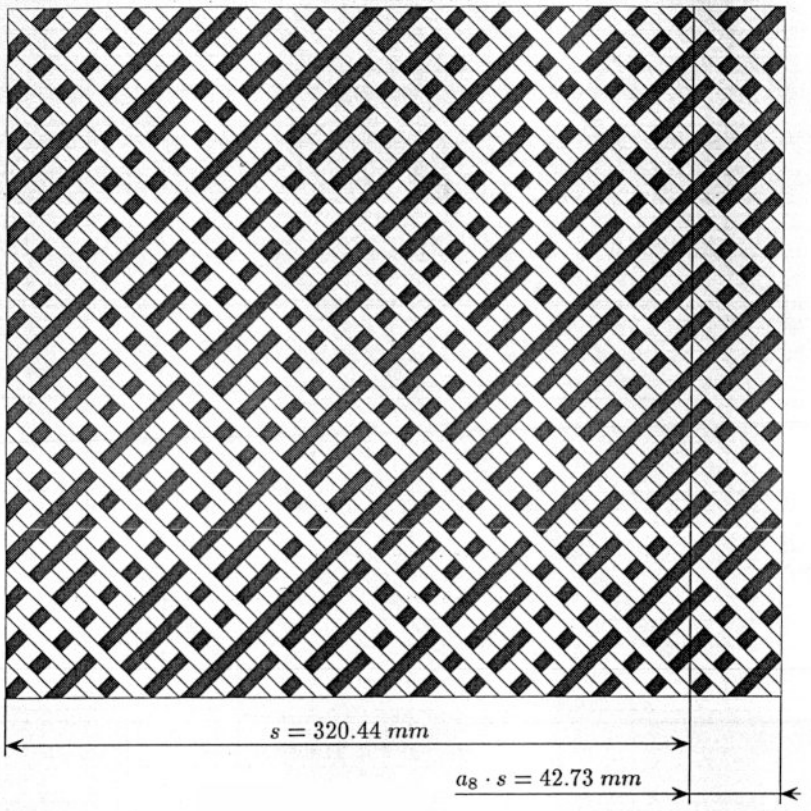
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/7



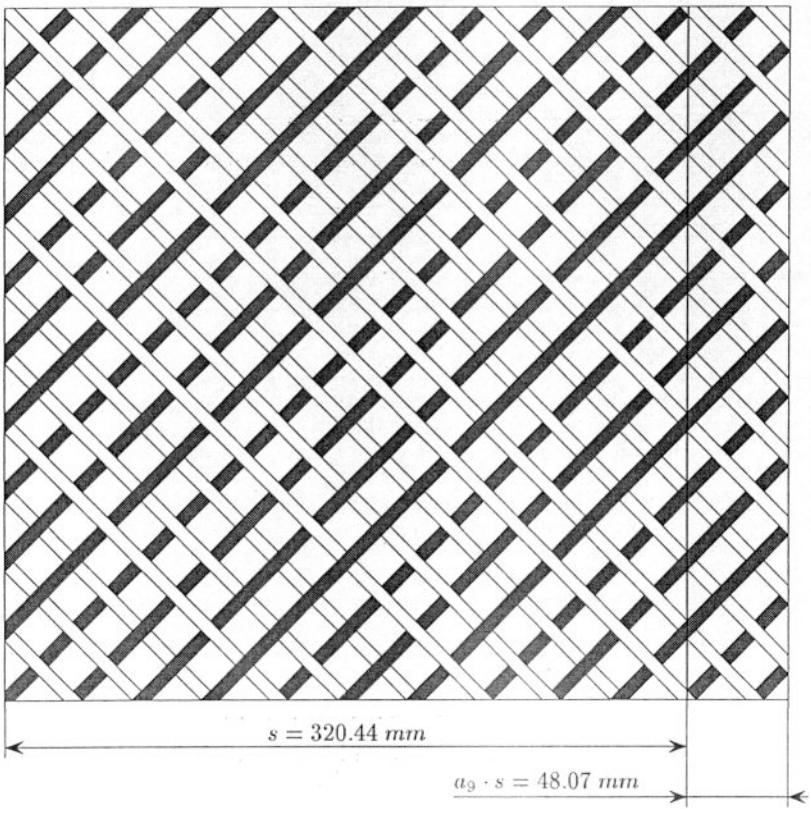
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/8



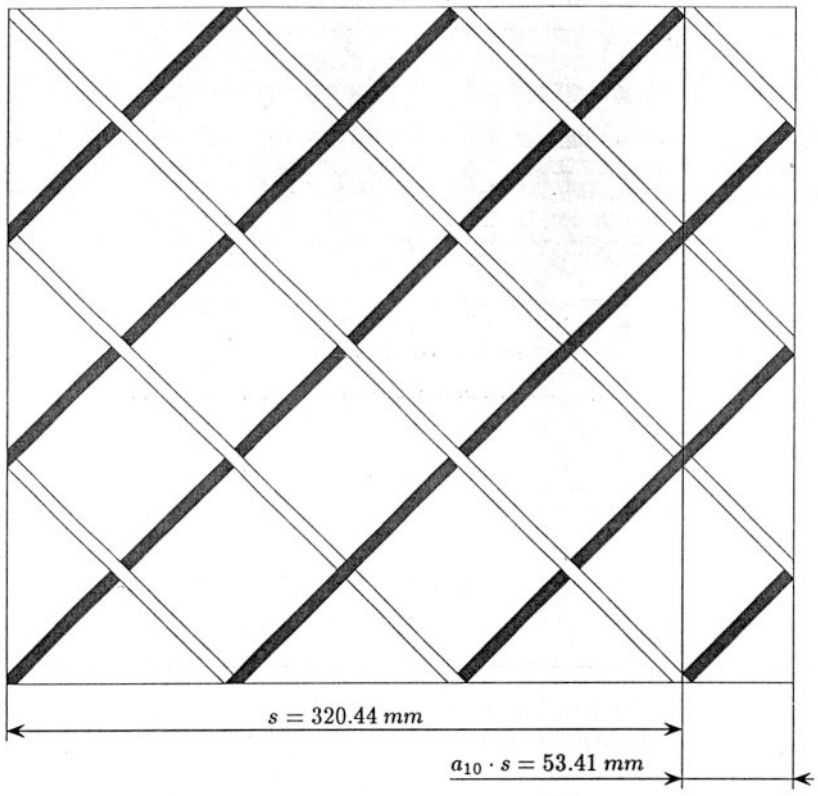
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/9



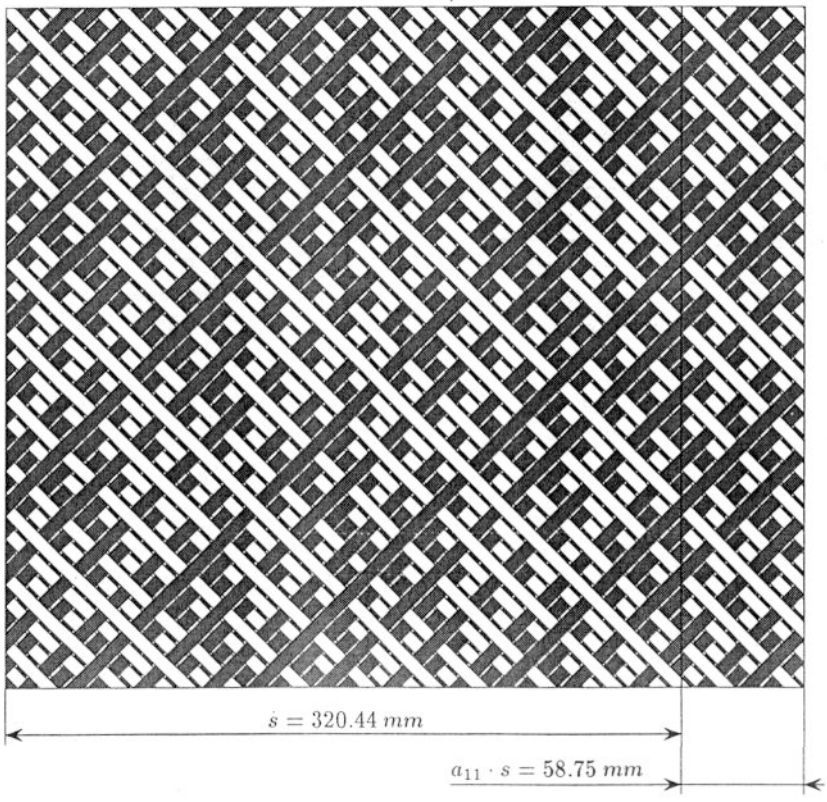
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/10



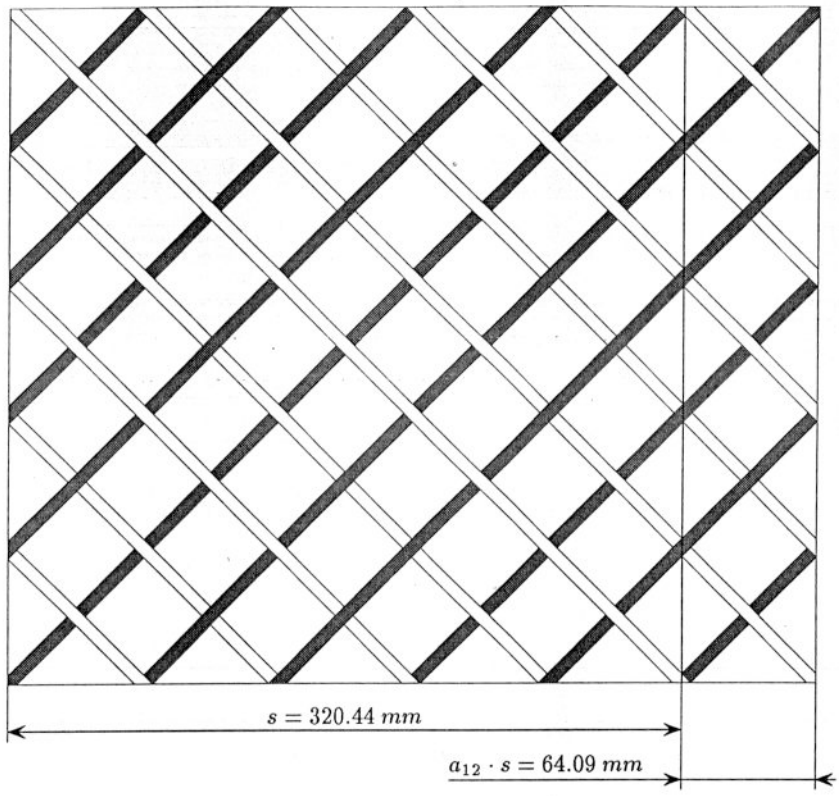
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/11



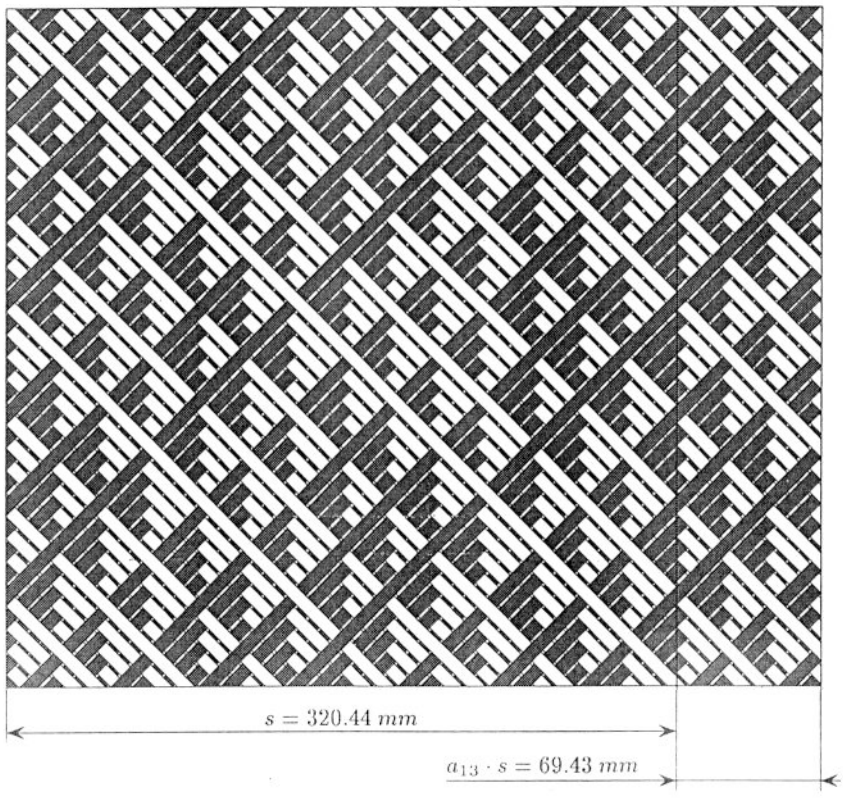
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/12



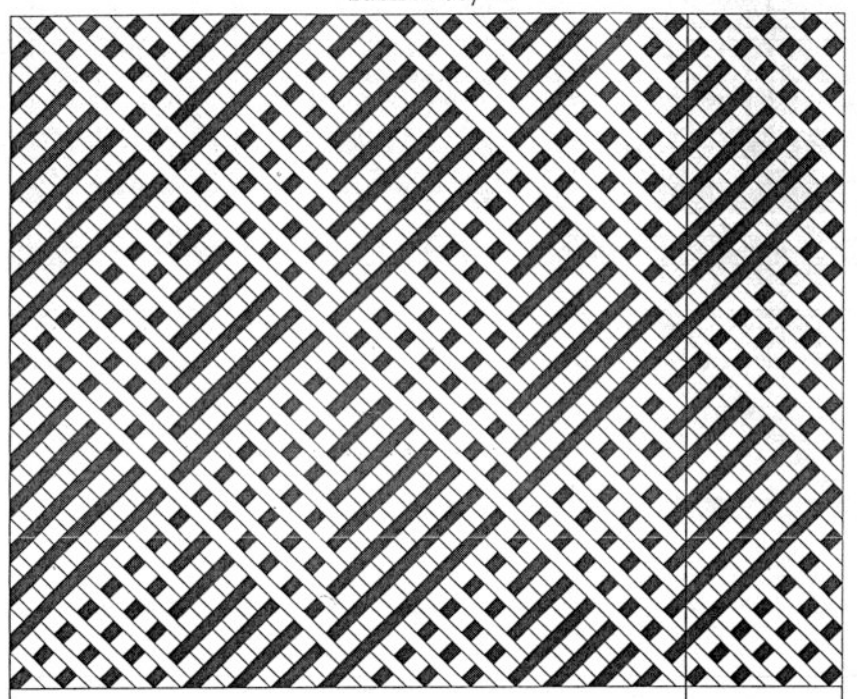
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/13



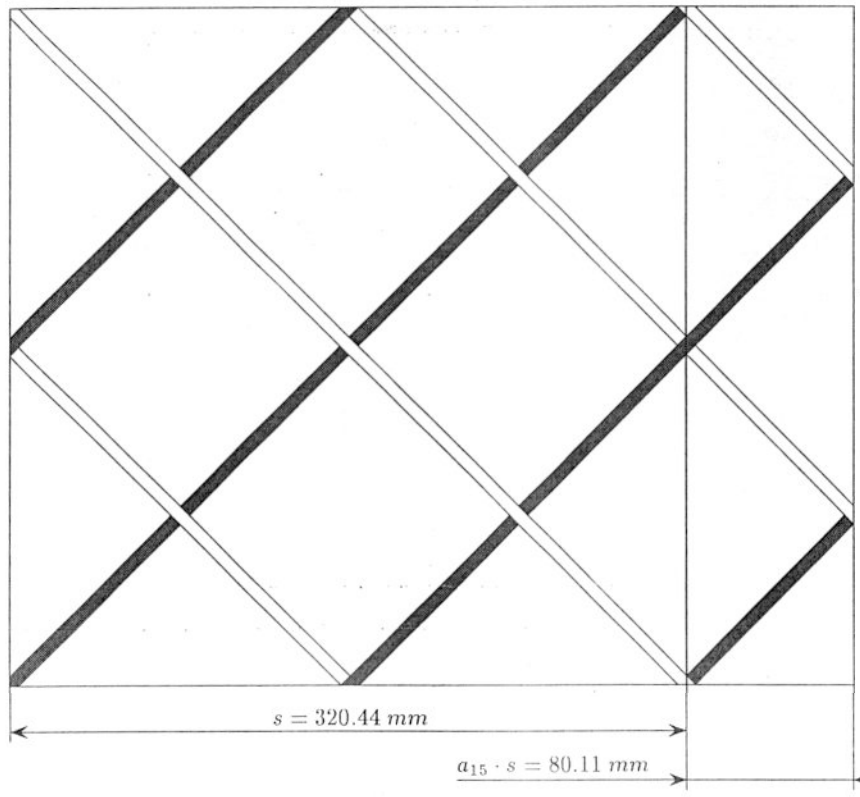
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 30/14



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

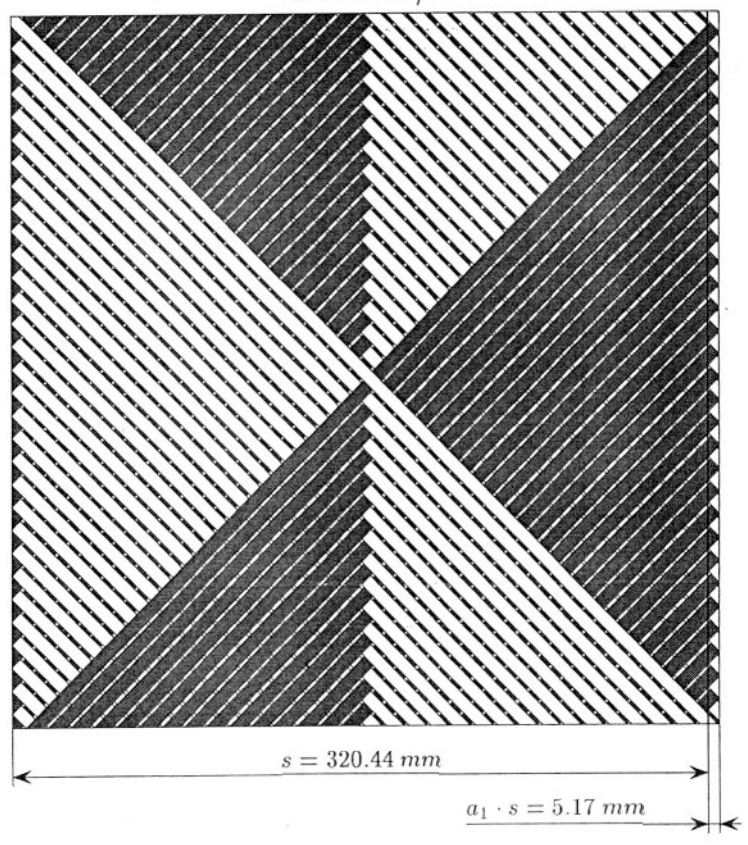
Tablica 30/15



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

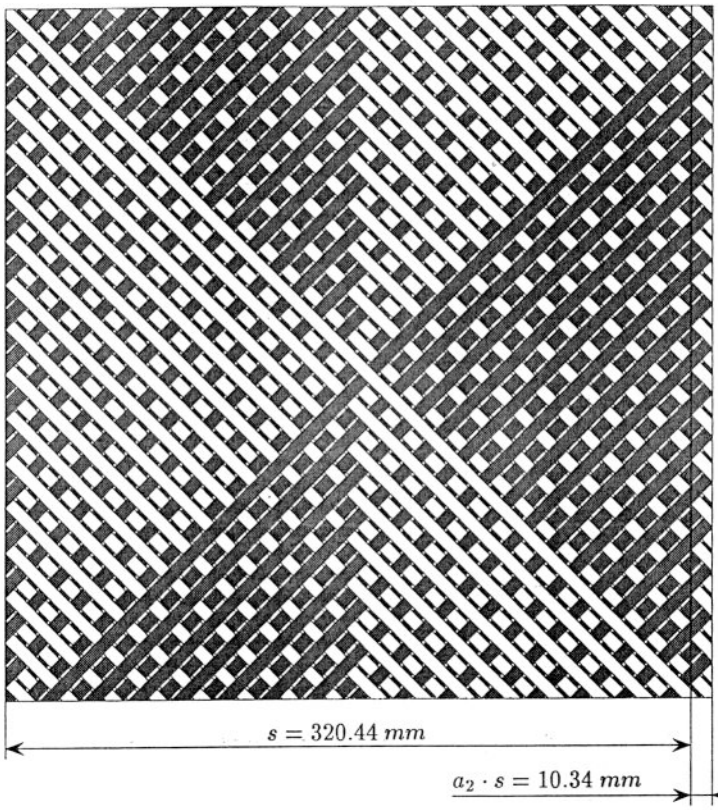
Liczba wiązek rowingu: 31																															$a_{Nr} =$
Nr	$\leftarrow \pi \cdot d \rightarrow$																														$= Nr/(2 \cdot 31)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1/62
2	16	1	17	2	18	3	19	4	20	5	21	6	22	7	23	8	24	9	25	10	26	11	27	12	28	13	29	14	30	15	31	2/62
3	21	11	1	22	12	2	23	13	3	24	14	4	25	15	5	26	16	6	27	17	7	28	18	8	29	19	9	30	20	10	31	3/62
4	8	16	24	1	9	17	25	2	10	18	26	3	11	19	27	4	12	20	28	5	13	21	29	6	14	22	30	7	15	23	31	4/62
5	25	19	13	7	1	26	20	14	8	2	27	21	15	9	3	28	22	16	10	4	29	23	17	11	5	30	24	18	12	6	31	5/62
6	26	21	16	11	6	1	27	22	17	12	7	2	28	23	18	13	8	3	29	24	19	14	9	4	30	25	20	15	10	5	31	6/62
7	9	18	27	5	14	23	1	10	19	28	6	15	24	2	11	20	29	7	16	25	3	12	21	30	8	17	26	4	13	22	31	7/62
8	4	8	12	16	20	24	28	1	5	9	13	17	21	25	29	2	6	10	14	18	22	26	30	3	7	11	15	19	23	27	31	8/62
9	7	14	21	28	4	11	18	25	1	8	15	22	29	5	12	19	26	2	9	16	23	30	6	13	20	27	3	10	17	24	31	9/62
10	28	25	22	19	16	13	10	7	4	1	29	26	23	20	17	14	11	8	5	2	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	31	10/62
11	17	3	20	6	23	9	26	12	29	15	1	18	4	21	7	24	10	27	13	30	16	2	19	5	22	8	25	11	28	14	31	11/62
12	13	26	8	21	3	16	29	11	24	6	19	1	14	27	9	22	4	17	30	12	25	7	20	2	15	28	10	23	5	18	31	12/62
13	12	24	5	17	29	10	22	3	15	27	8	20	1	13	25	6	18	30	11	23	4	16	28	9	21	2	14	26	7	19	31	13/62
14	20	9	29	18	7	27	16	5	25	14	3	23	12	1	21	10	30	19	8	28	17	6	26	15	4	24	13	2	22	11	31	14/62
15	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	31	15/62

Tablica 31/1



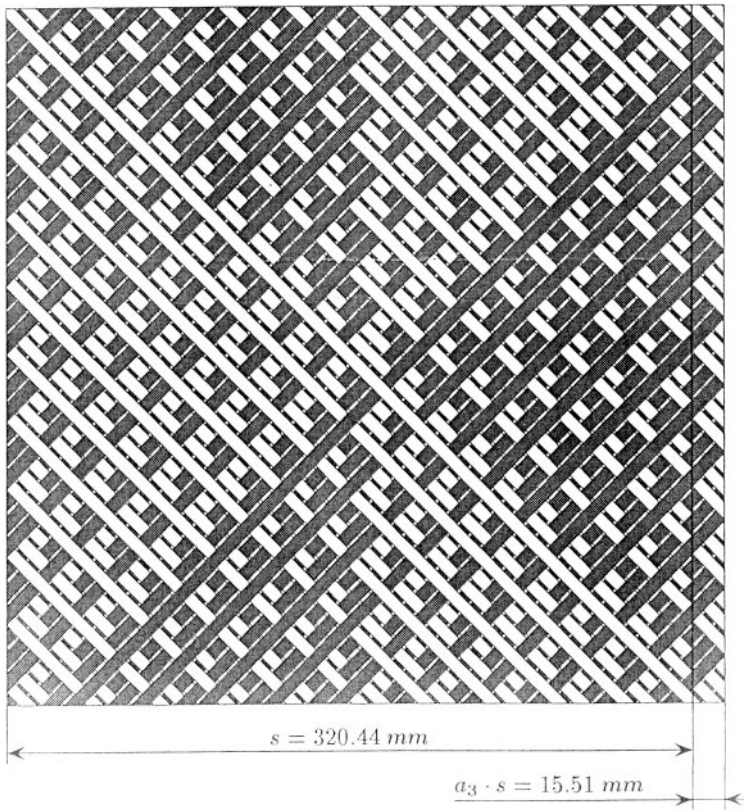
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/2



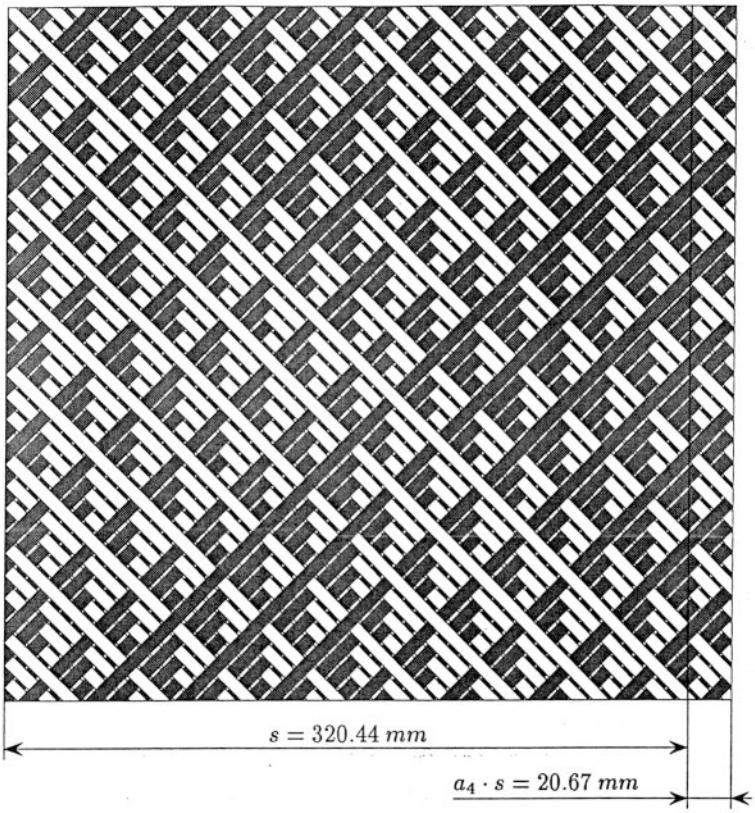
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/3



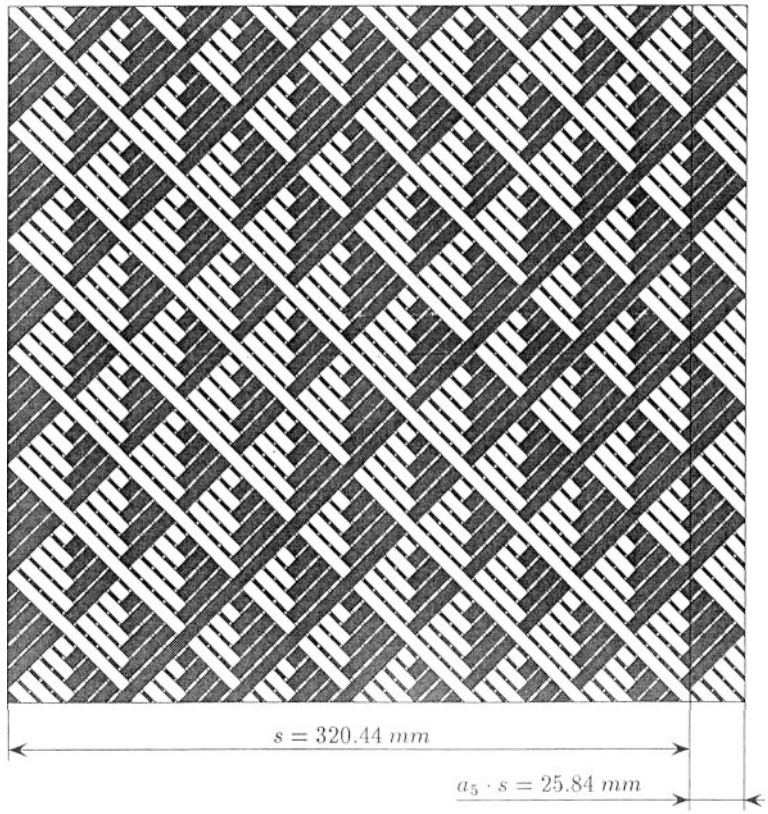
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/4



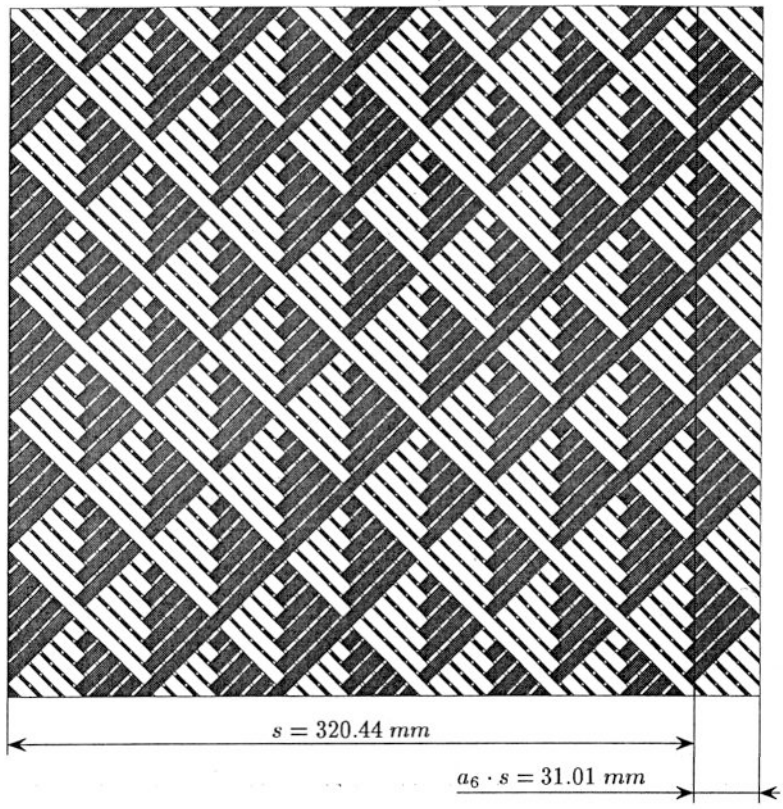
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/5



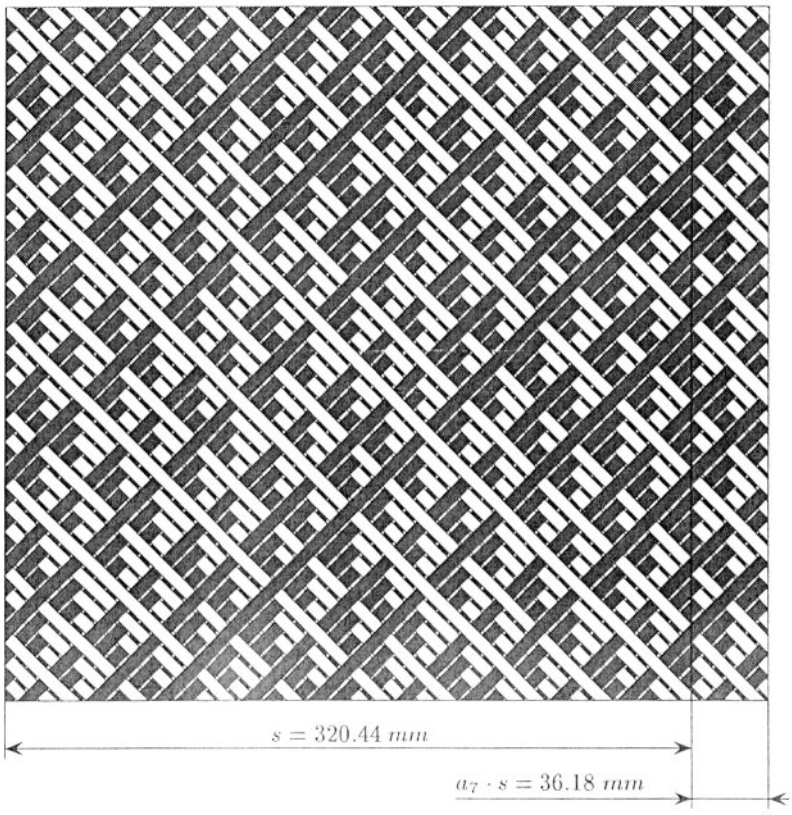
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/6



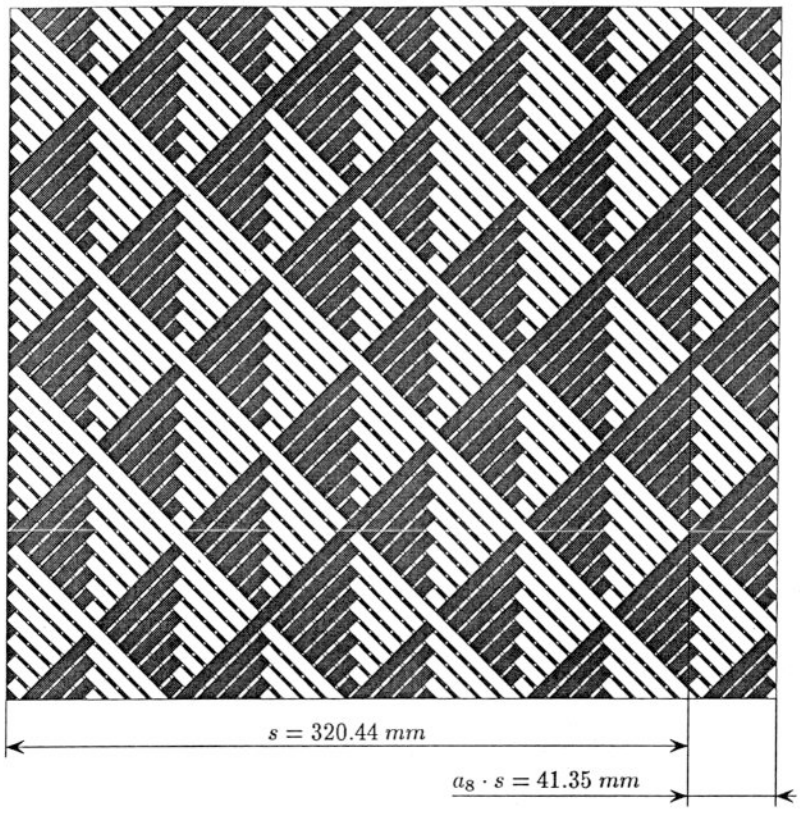
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/7



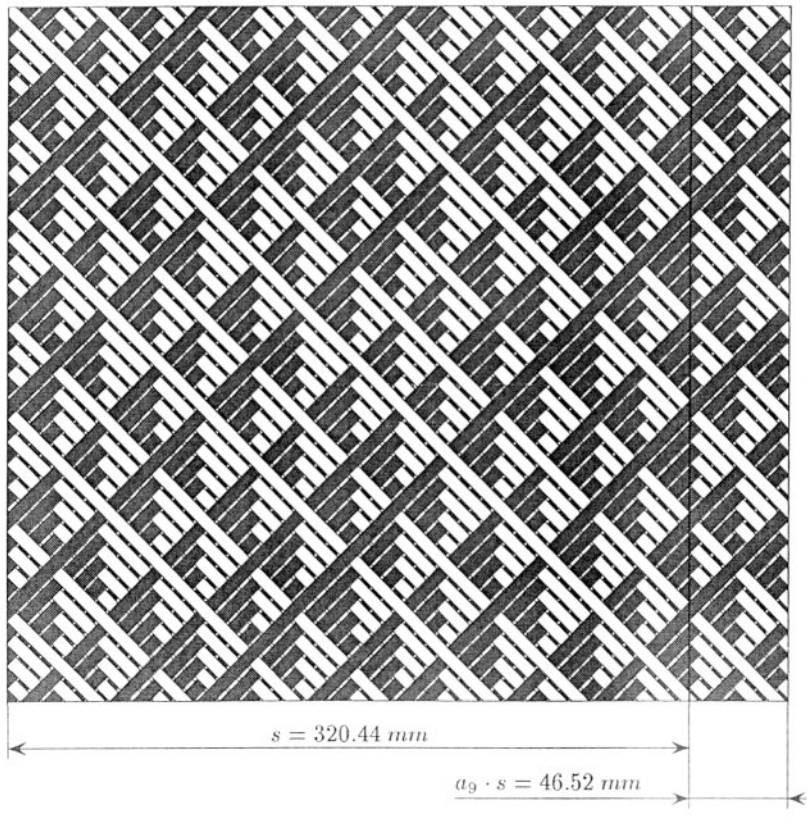
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/8



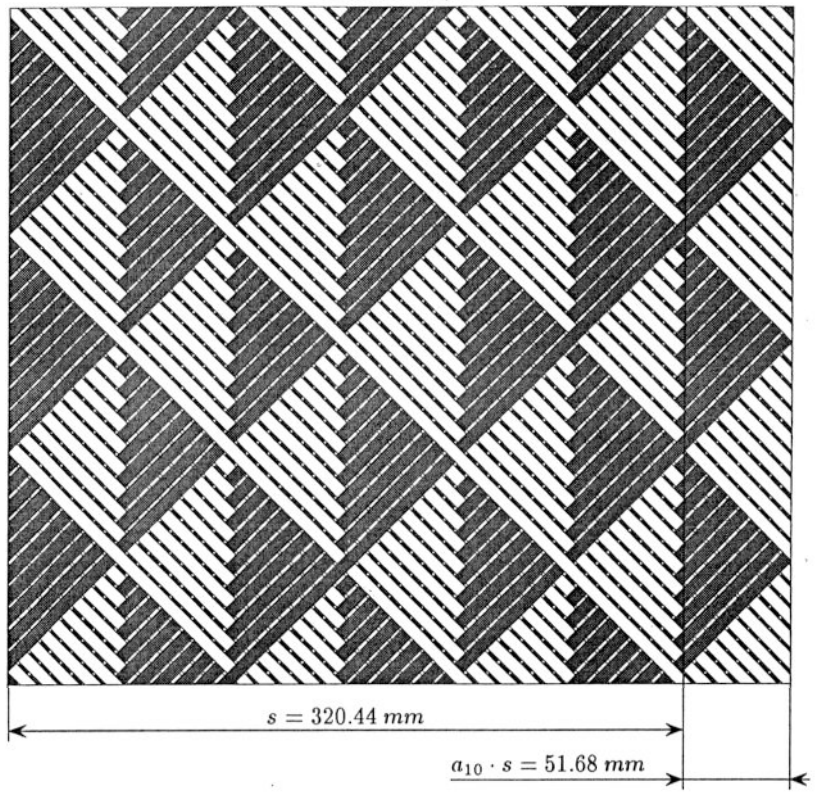
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/9



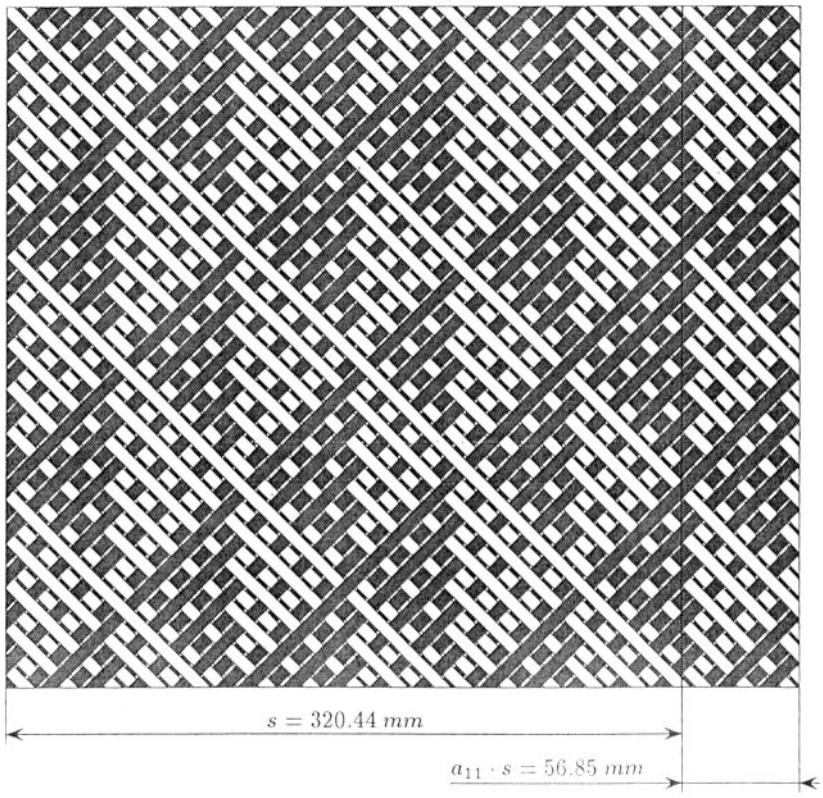
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/10



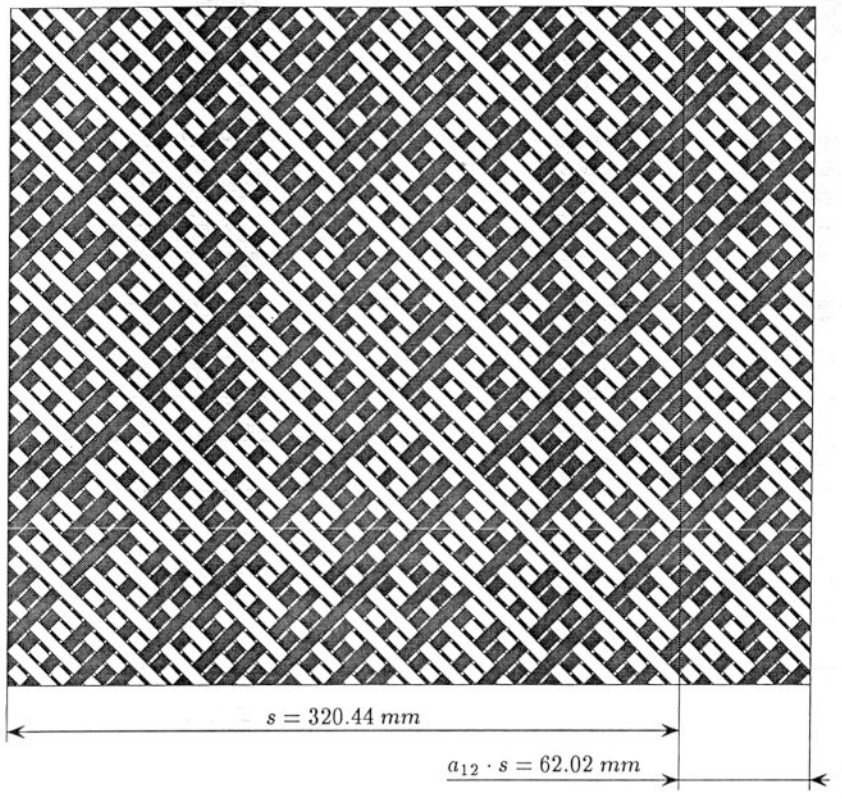
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/11



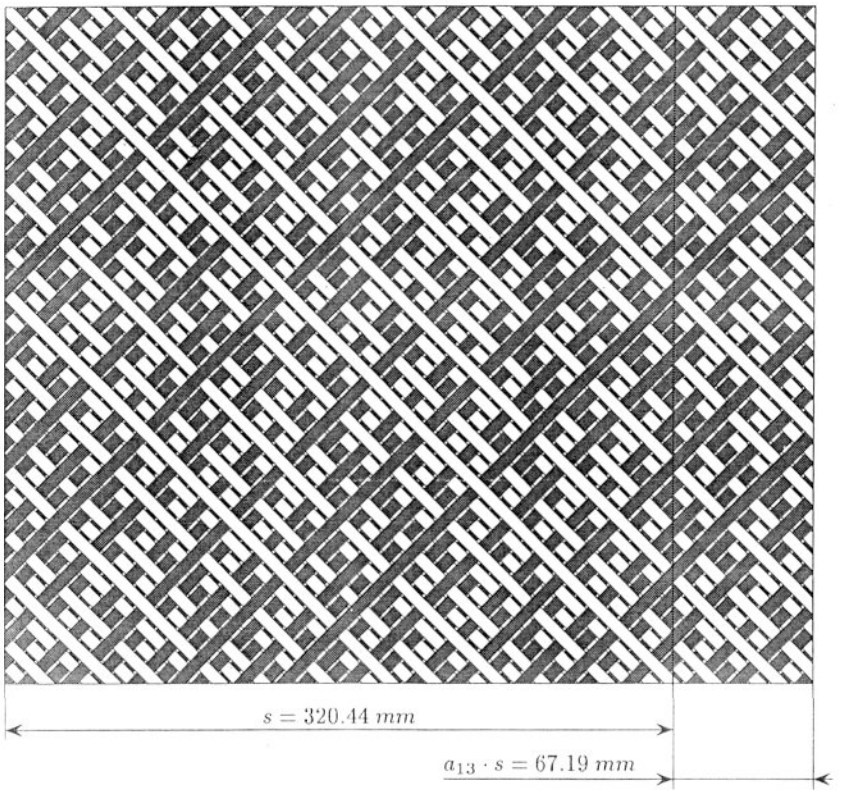
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/12



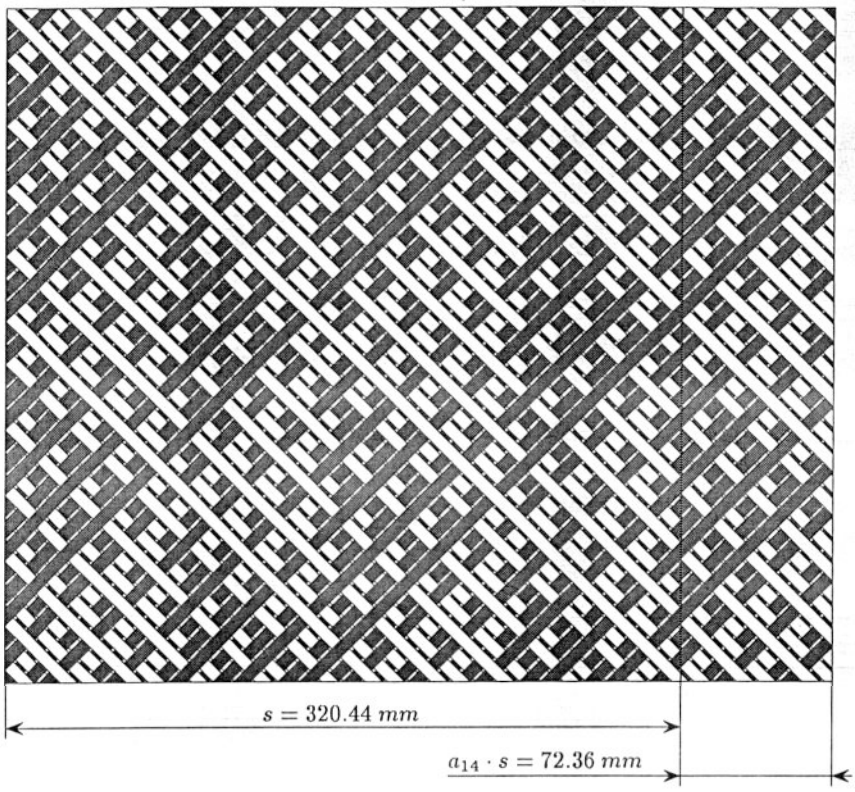
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/13



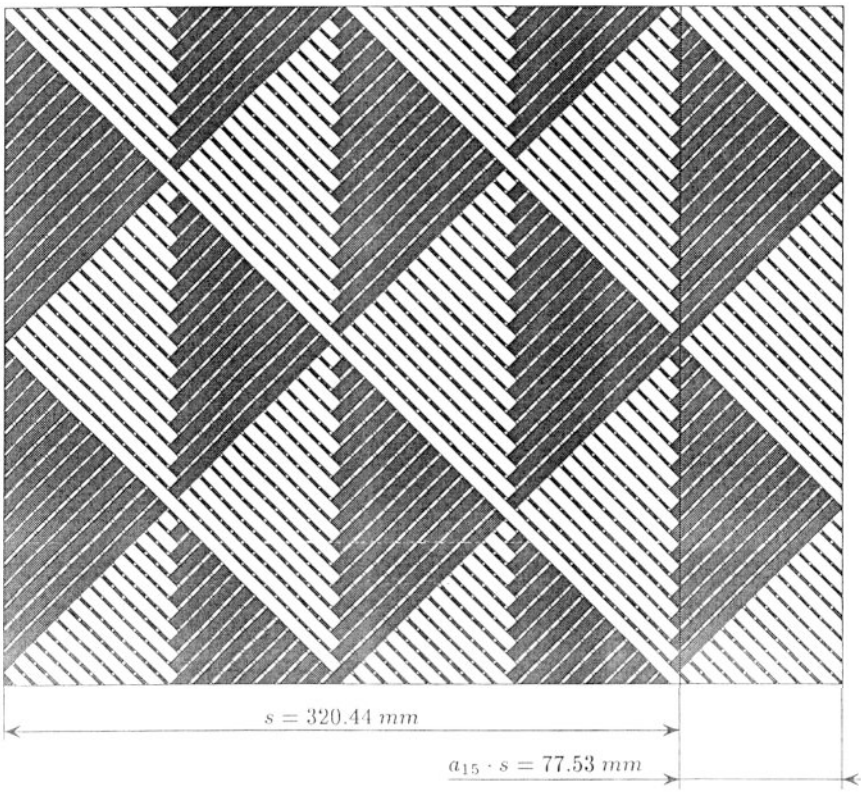
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 31/14



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

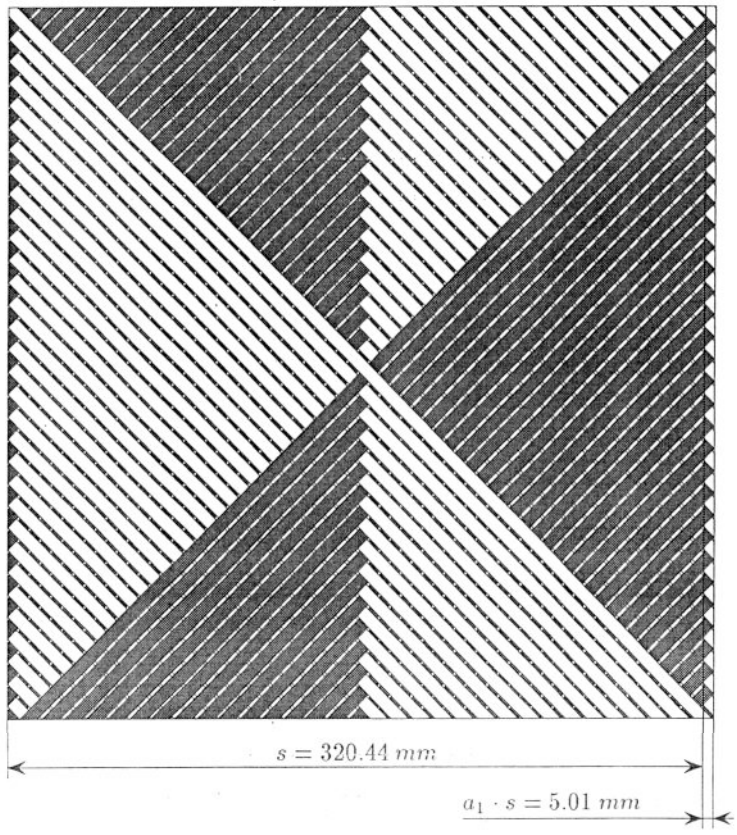
Tablica 31/15



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

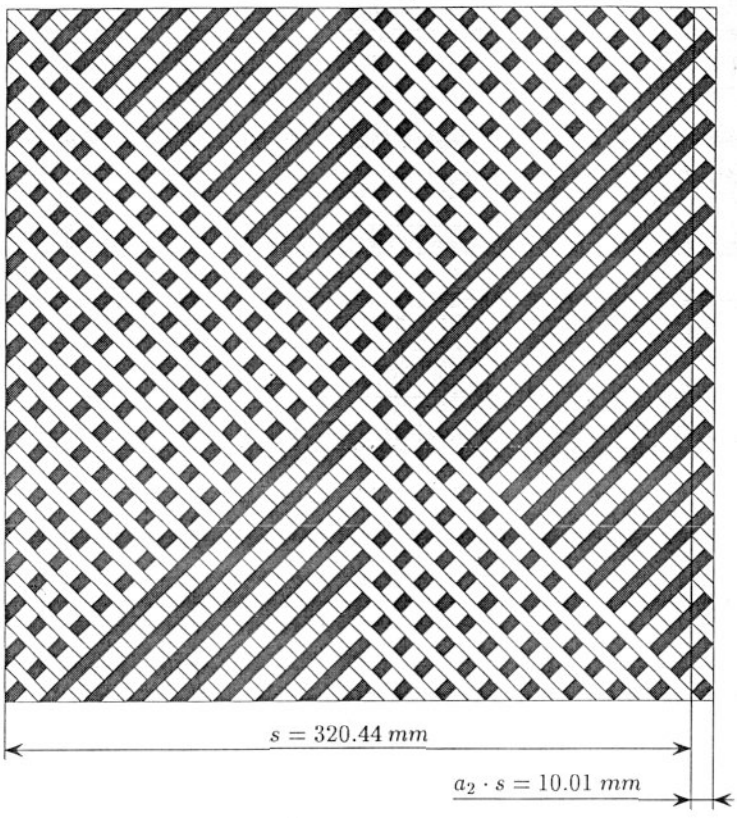
Liczba wiązek rowingu: 32																																$a_{Nr} =$
Nr	$\pi \cdot d$																															$= Nr/(2 \cdot 32)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	1/64
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	0	16	2/64
3	11	22	1	12	23	2	13	24	3	14	25	4	15	26	5	16	27	6	17	28	7	18	29	8	19	30	9	20	31	10	21	32	3/64
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0	5	0	0	0	6	0	0	0	7	0	0	0	8	4/64
5	13	26	7	20	1	14	27	8	21	2	15	28	9	22	3	16	29	10	23	4	17	30	11	24	5	18	31	12	25	6	19	32	5/64
6	0	11	0	6	0	1	0	12	0	7	0	2	0	13	0	8	0	3	0	14	0	9	0	4	0	15	0	10	0	5	0	16	6/64
7	23	14	5	28	19	10	1	24	15	6	29	20	11	2	25	16	7	30	21	12	3	26	17	8	31	22	13	4	27	18	9	32	7/64
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4	8/64
9	25	18	11	4	29	22	15	8	1	26	19	12	5	30	23	16	9	2	27	20	13	6	31	24	17	10	3	28	21	14	7	32	9/64
10	0	13	0	10	0	7	0	4	0	1	0	14	0	11	0	8	0	5	0	2	0	15	0	12	0	9	0	6	0	3	0	16	10/64
11	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	11/64
12	0	0	0	3	0	0	0	6	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0	7	0	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	8	12/64
13	5	10	15	20	25	30	3	8	13	18	23	28	1	6	11	16	21	26	31	4	9	14	19	24	29	2	7	12	17	22	27	32	13/64
14	0	7	0	14	0	5	0	12	0	3	0	10	0	1	0	8	0	15	0	6	0	13	0	4	0	11	0	2	0	9	0	16	14/64
15	15	30	13	28	11	26	9	24	7	22	5	20	3	18	1	16	31	14	29	12	27	10	25	8	23	6	21	4	19	2	17	32	15/64
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	16/64

Tablica 32/1



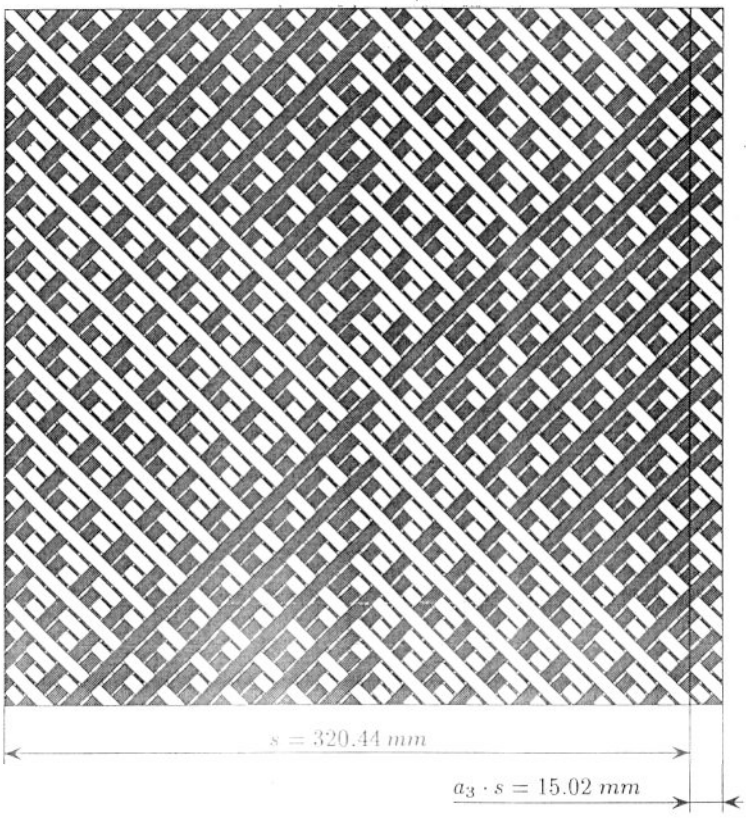
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/2



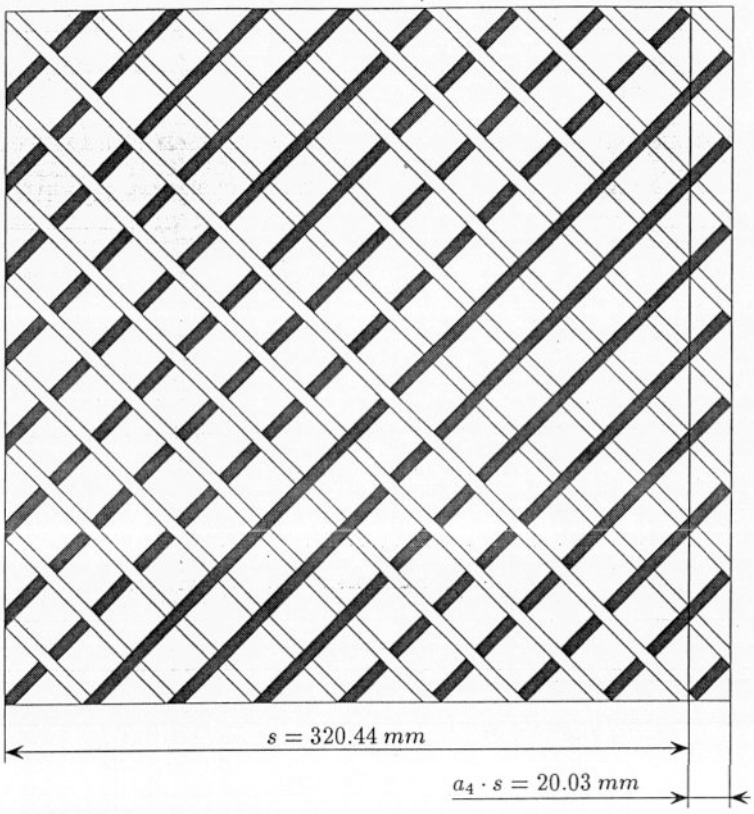
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 32/3



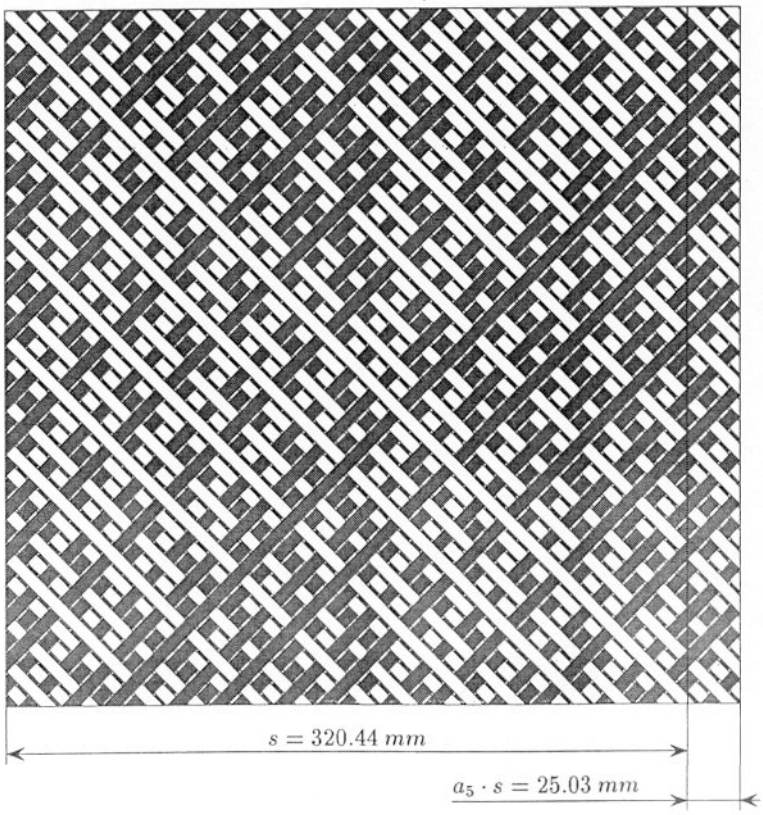
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 32/4



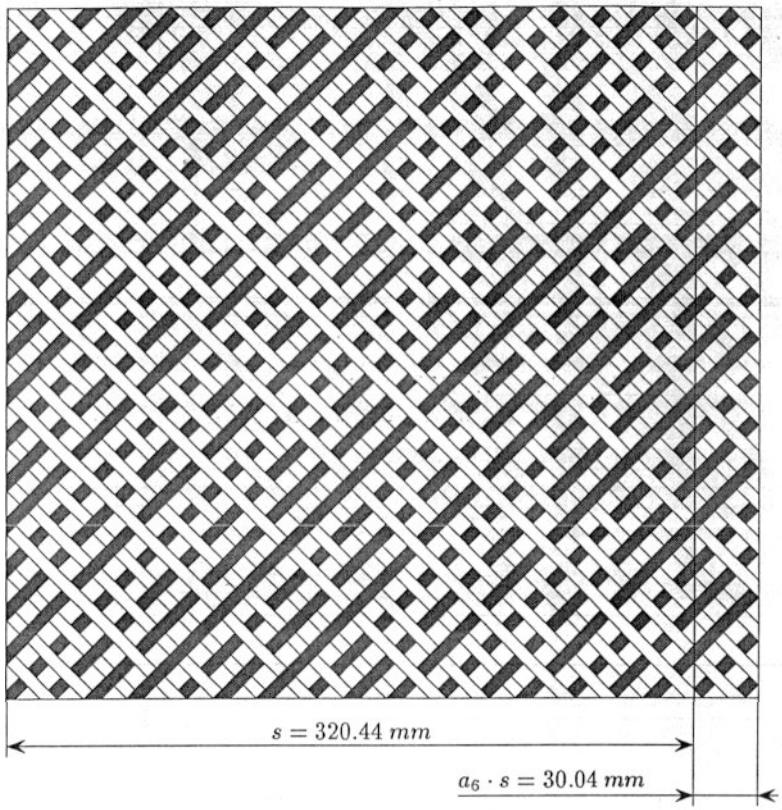
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/5



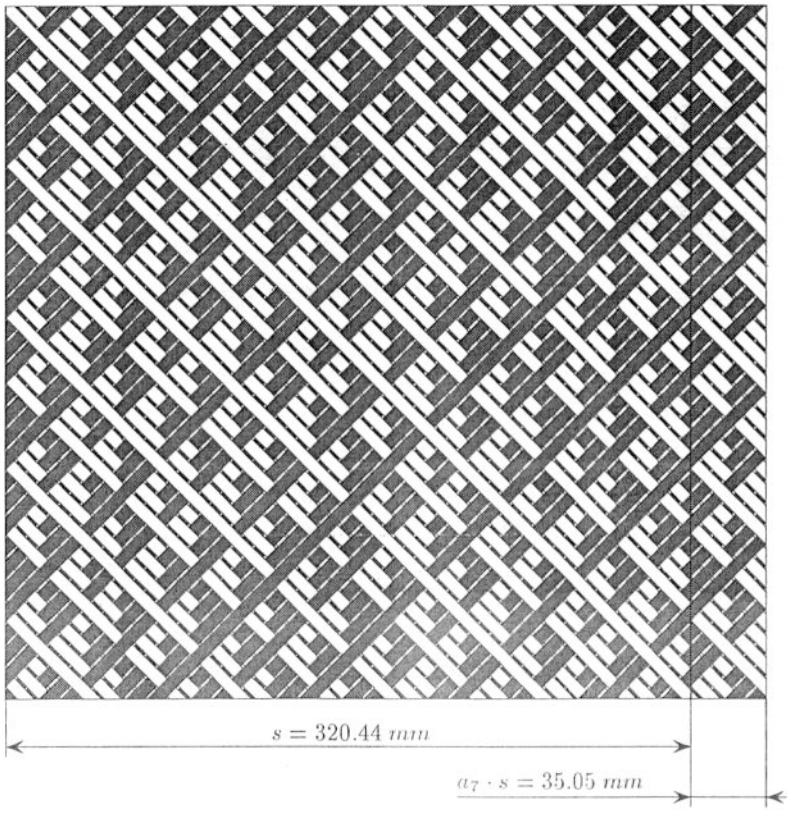
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/6



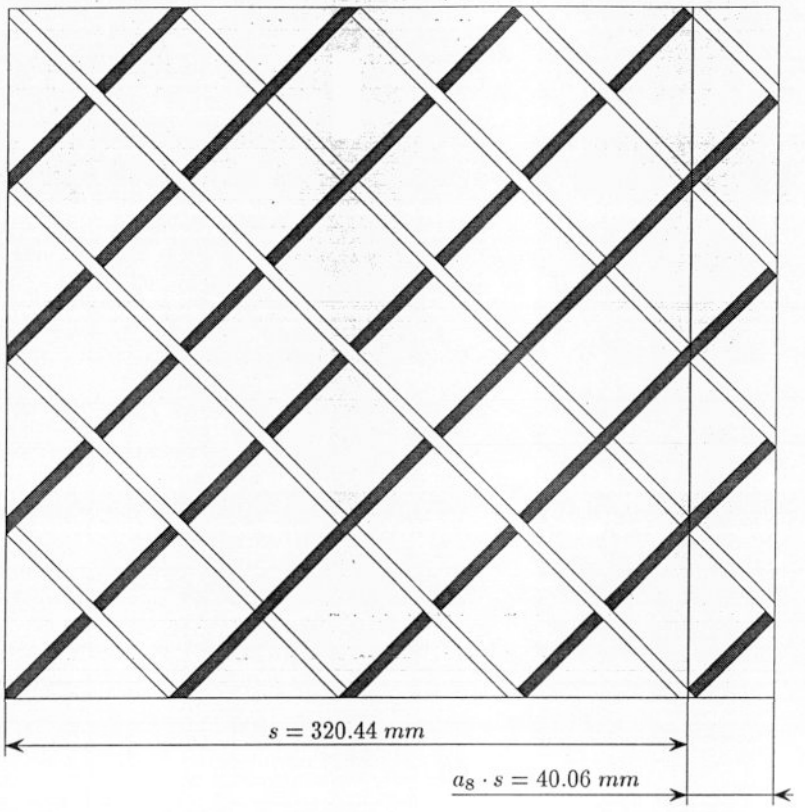
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/7



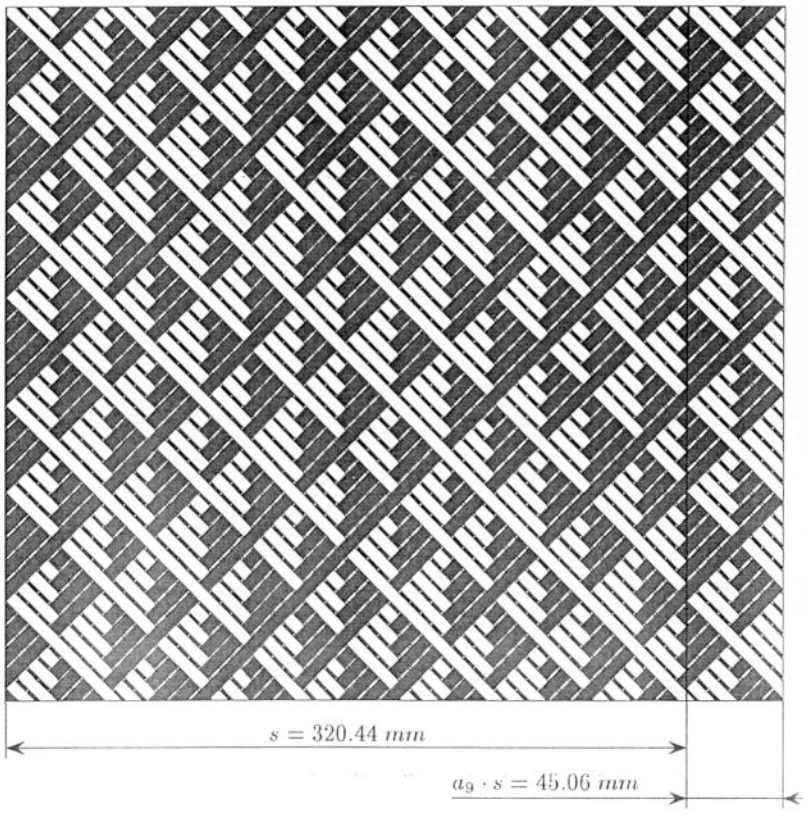
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/8



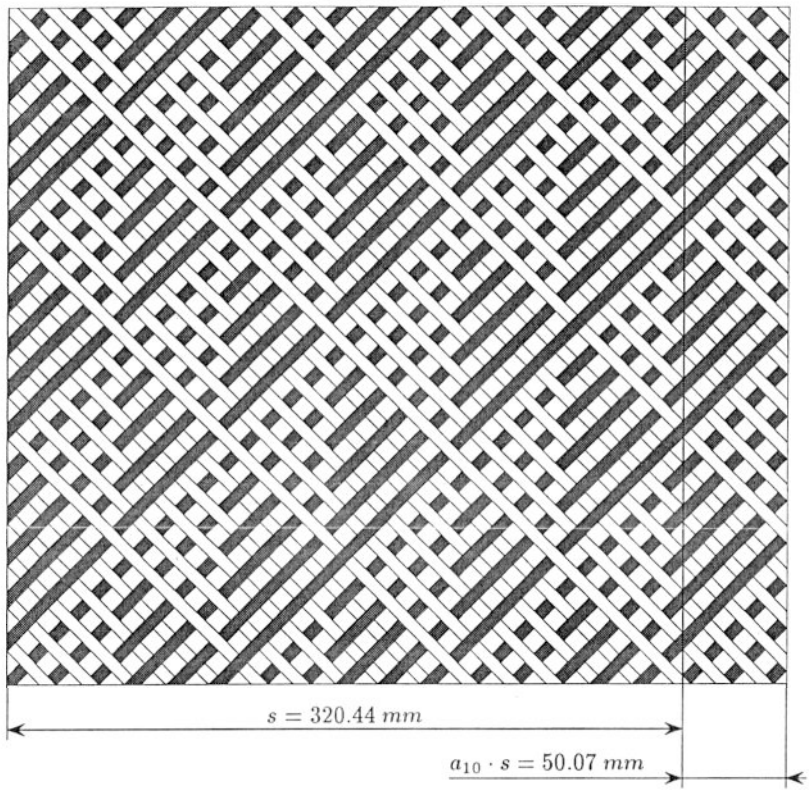
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/9



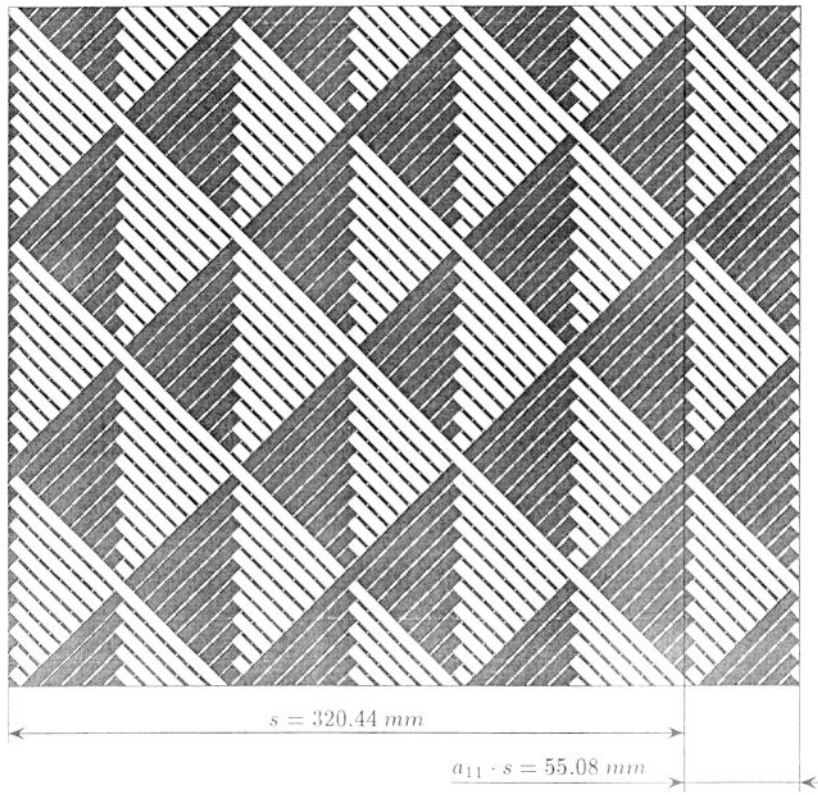
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/10



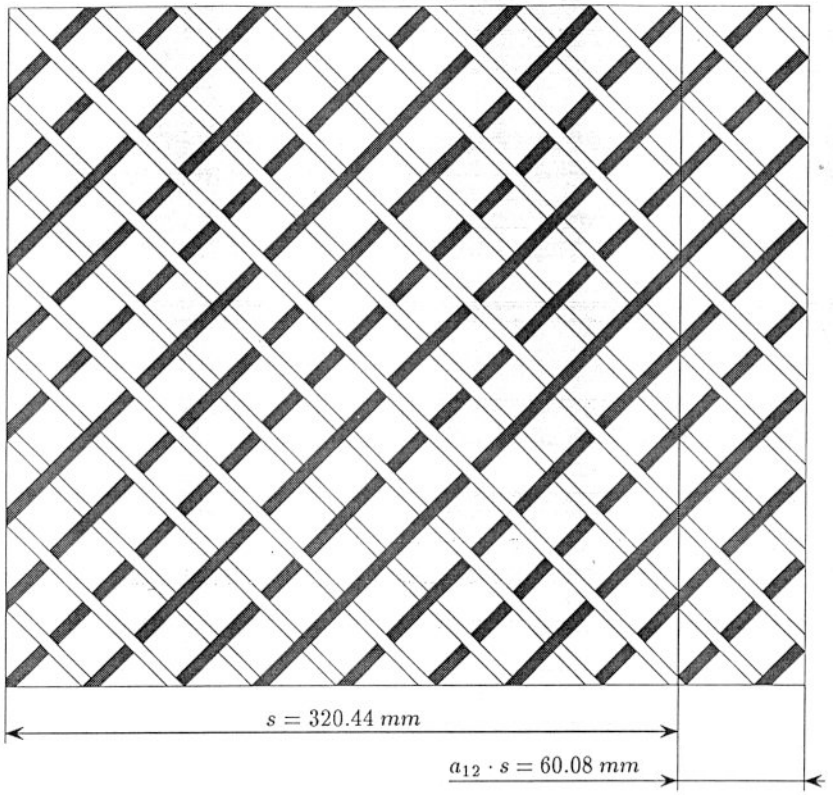
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/11



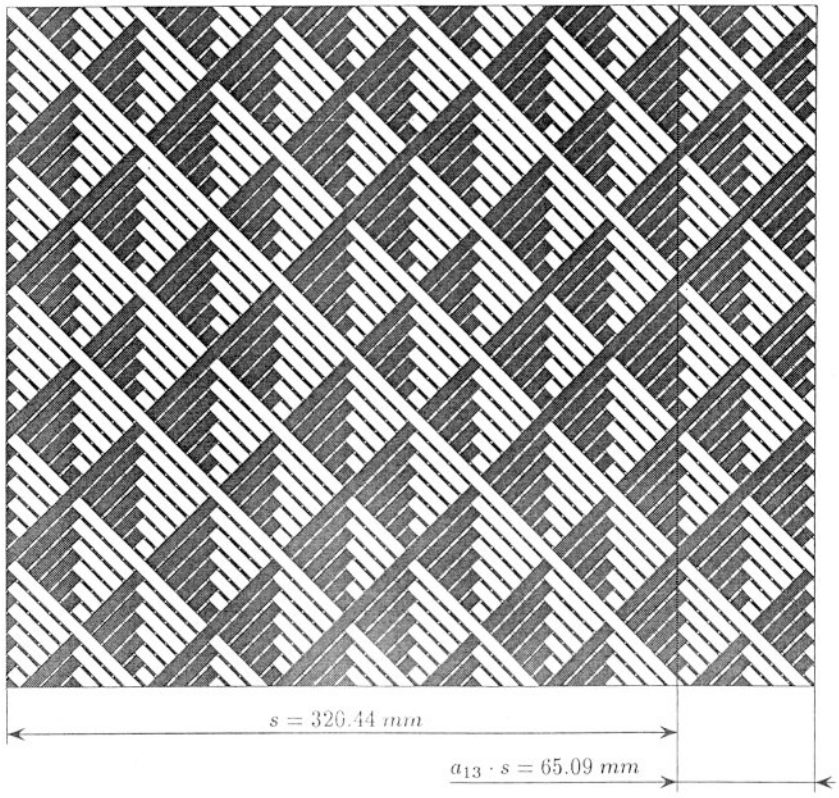
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/12



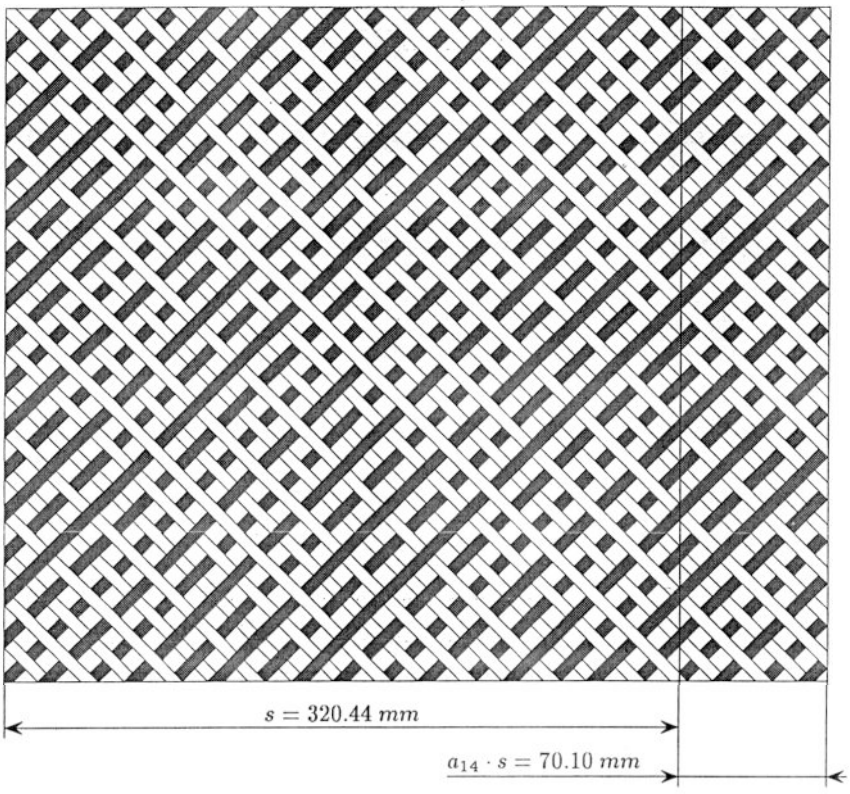
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/13



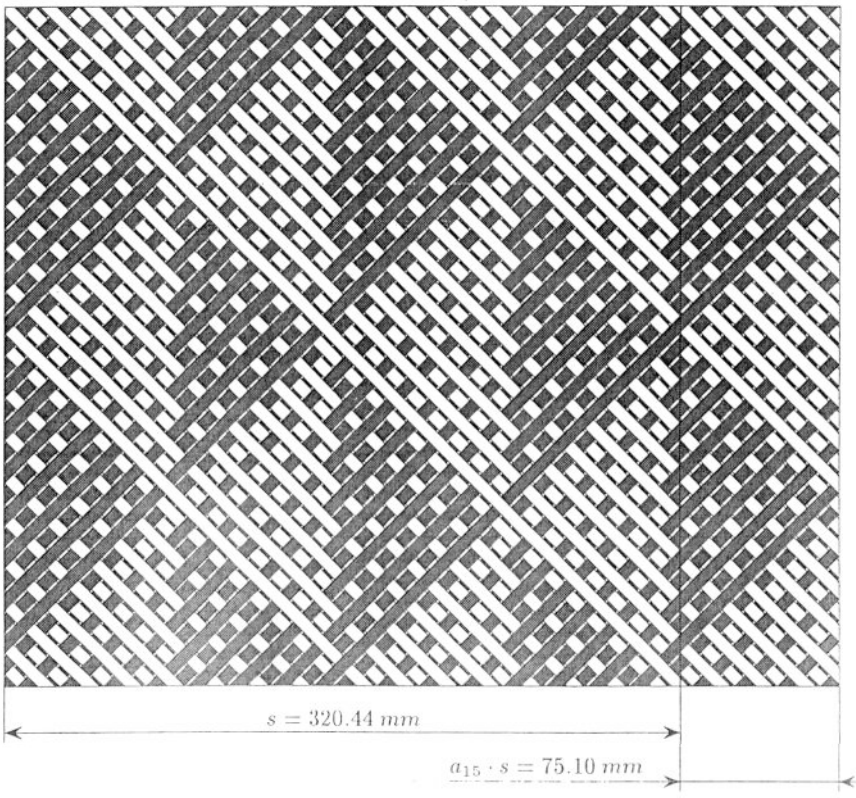
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/14



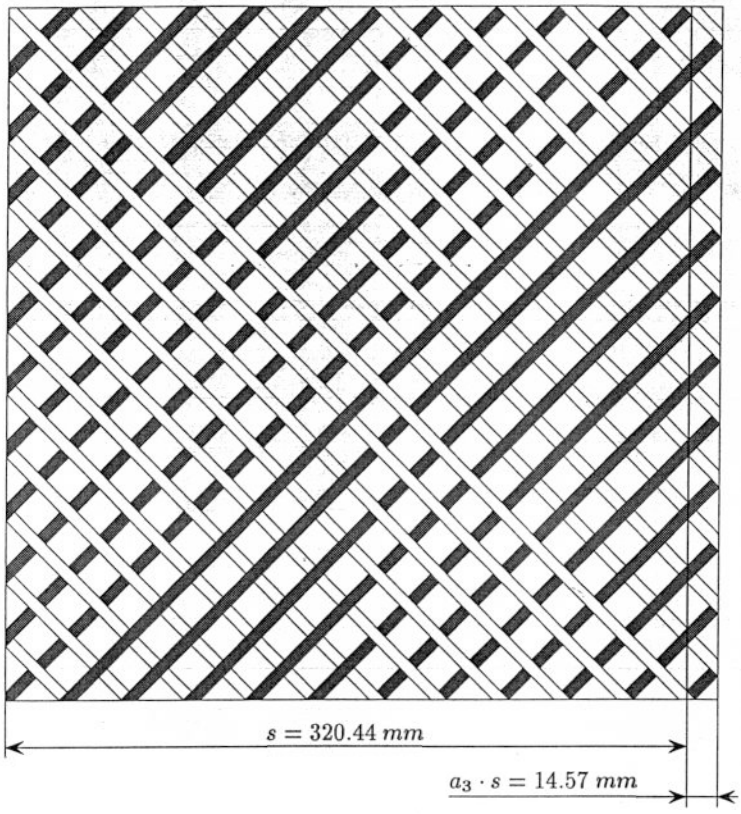
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 32/15



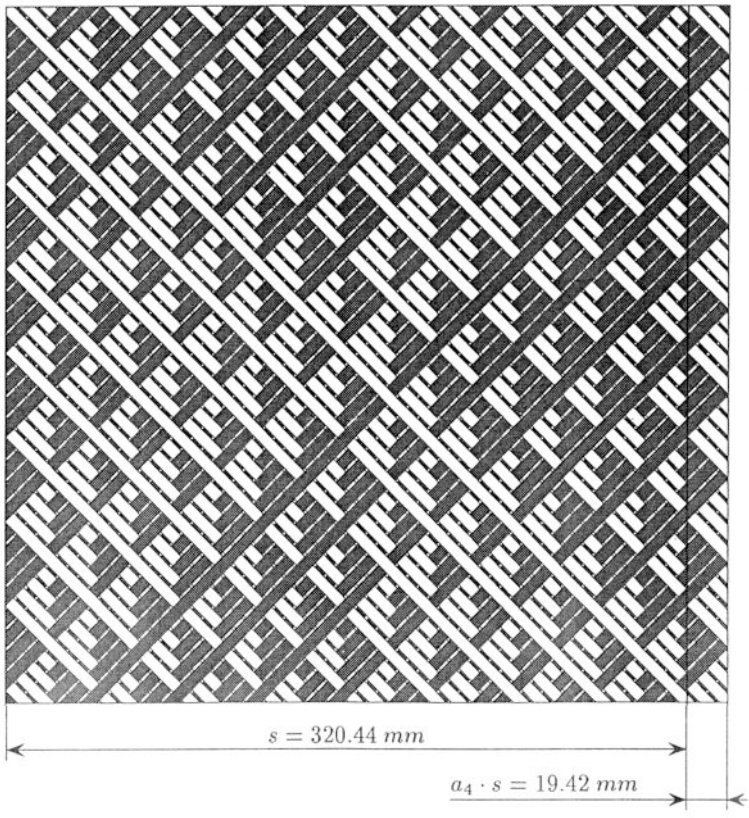
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/3



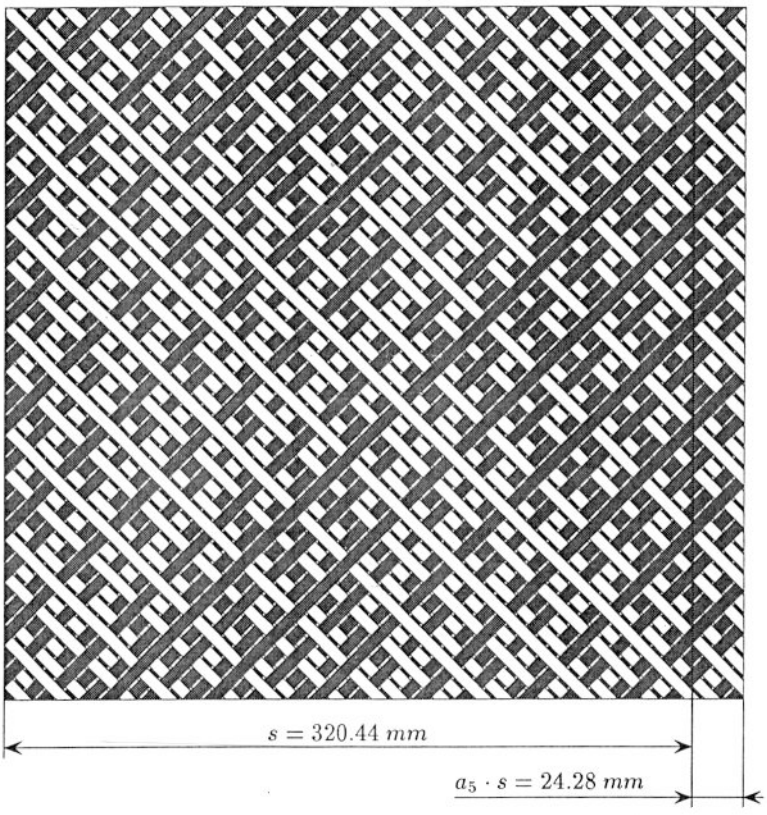
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/4



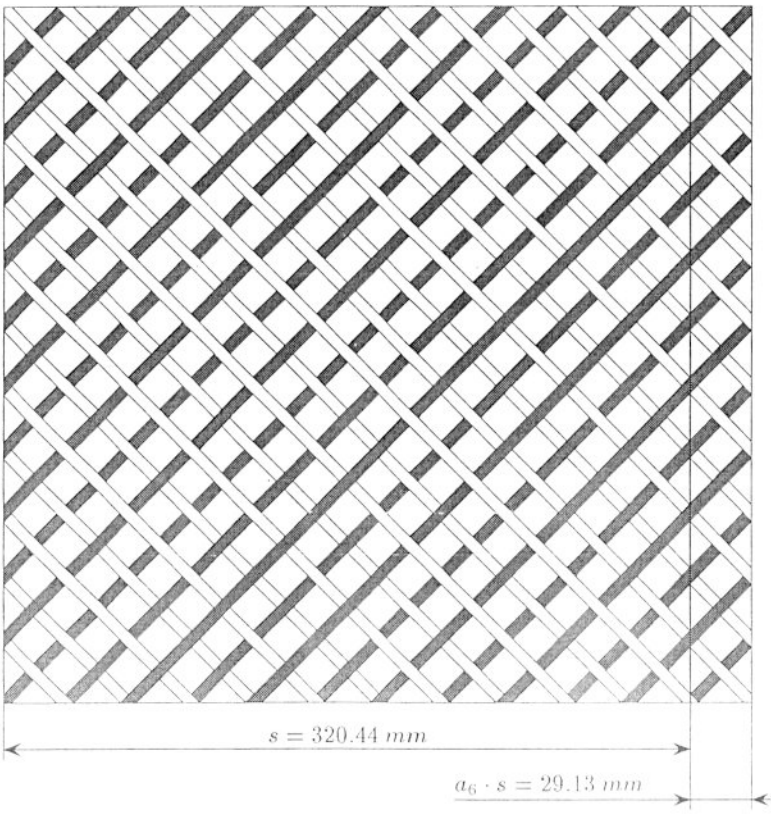
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/5



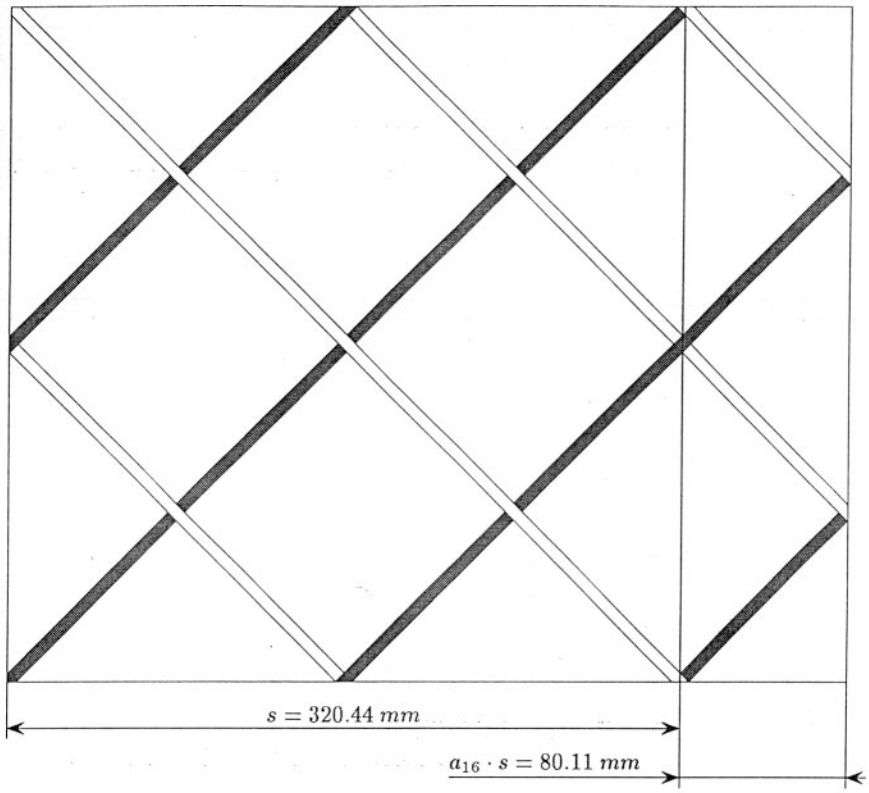
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/6



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

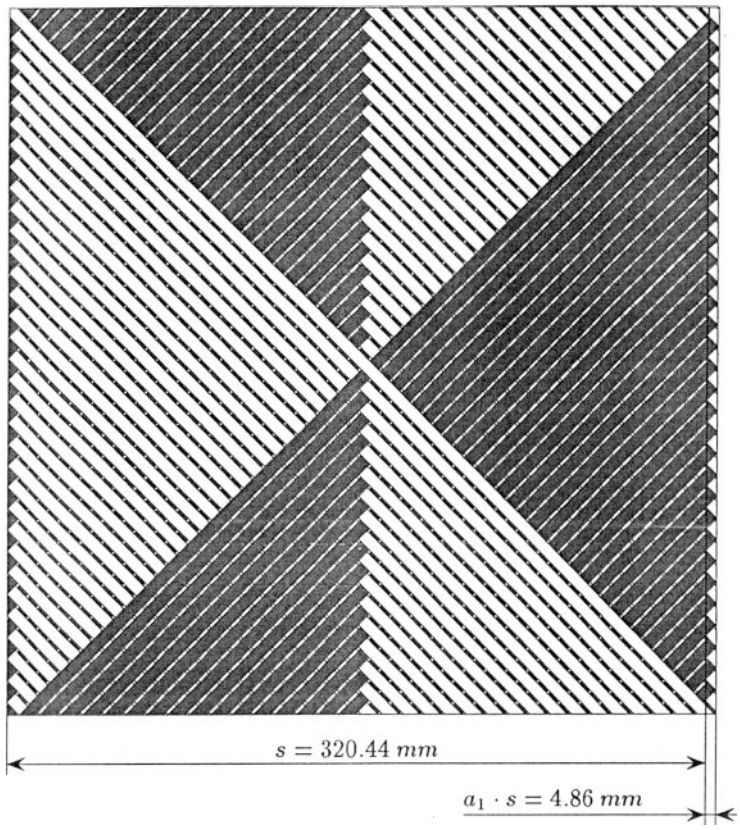
Tablica 32/16



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

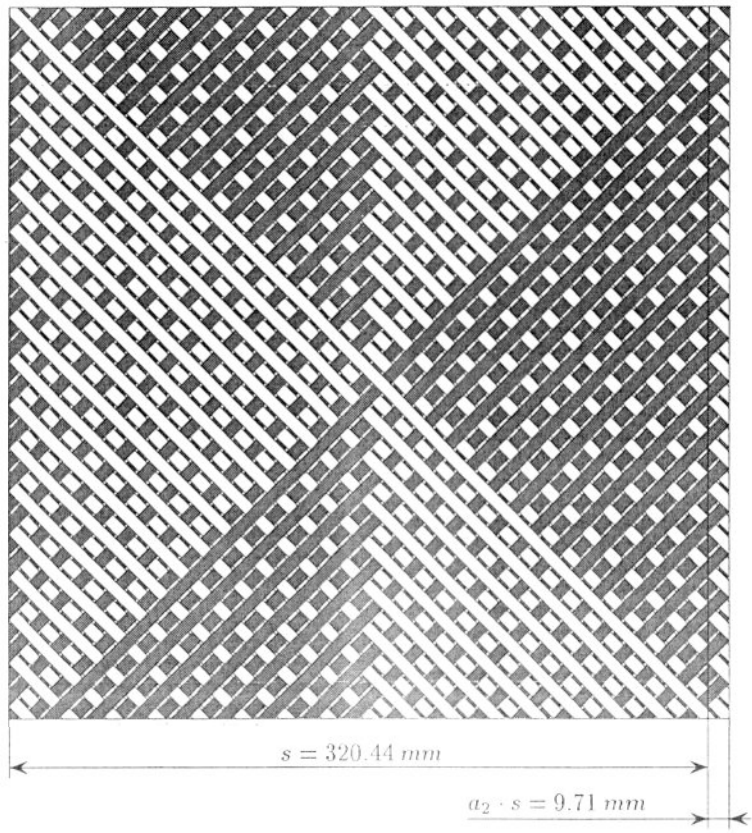
Liczba wiązek rowingu: 33																																$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																															$= Nr/(2 \cdot 33)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	1/66
2	17	1	18	2	19	3	20	4	21	5	22	6	23	7	24	8	25	9	26	10	27	11	28	12	29	13	30	14	31	15	32	16	33	2/66
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	0	0	9	0	0	10	0	0	11	3/66
4	25	17	9	1	26	18	10	2	27	19	11	3	28	20	12	4	29	21	13	5	30	22	14	6	31	23	15	7	32	24	16	8	33	4/66
5	20	7	27	14	1	21	8	28	15	2	22	9	29	16	3	23	10	30	17	4	24	11	31	18	5	25	12	32	19	6	26	13	33	5/66
6	0	0	6	0	0	1	0	0	7	0	0	2	0	0	8	0	0	3	0	0	9	0	0	4	0	0	10	0	0	5	0	0	11	6/66
7	19	5	24	10	29	15	1	20	6	25	11	30	16	2	21	7	26	12	31	17	3	22	8	27	13	32	18	4	23	9	28	14	33	7/66
8	29	25	21	17	13	9	5	1	30	26	22	18	14	10	6	2	31	27	23	19	15	11	7	3	32	28	24	20	16	12	8	4	33	8/66
9	0	0	4	0	0	8	0	0	1	0	0	5	0	0	9	0	0	2	0	0	6	0	0	10	0	0	3	0	0	7	0	0	11	9/66
10	10	20	30	7	17	27	4	14	24	1	11	21	31	8	18	28	5	15	25	2	12	22	32	9	19	29	6	16	26	3	13	23	33	10/66
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	11/66
12	0	0	3	0	0	6	0	0	9	0	0	1	0	0	4	0	0	7	0	0	10	0	0	2	0	0	5	0	0	8	0	0	11	12/66
13	28	23	18	13	8	3	31	26	21	16	11	6	1	29	24	19	14	9	4	32	27	22	17	12	7	2	30	25	20	15	10	5	33	13/66
14	26	19	12	5	31	24	17	10	3	29	22	15	8	1	27	20	13	6	32	25	18	11	4	30	23	16	9	2	28	21	14	7	33	14/66
15	0	0	9	0	0	7	0	0	5	0	0	3	0	0	1	0	0	10	0	0	8	0	0	6	0	0	4	0	0	2	0	0	11	15/66
16	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	33	16/66

Tablica 33/1



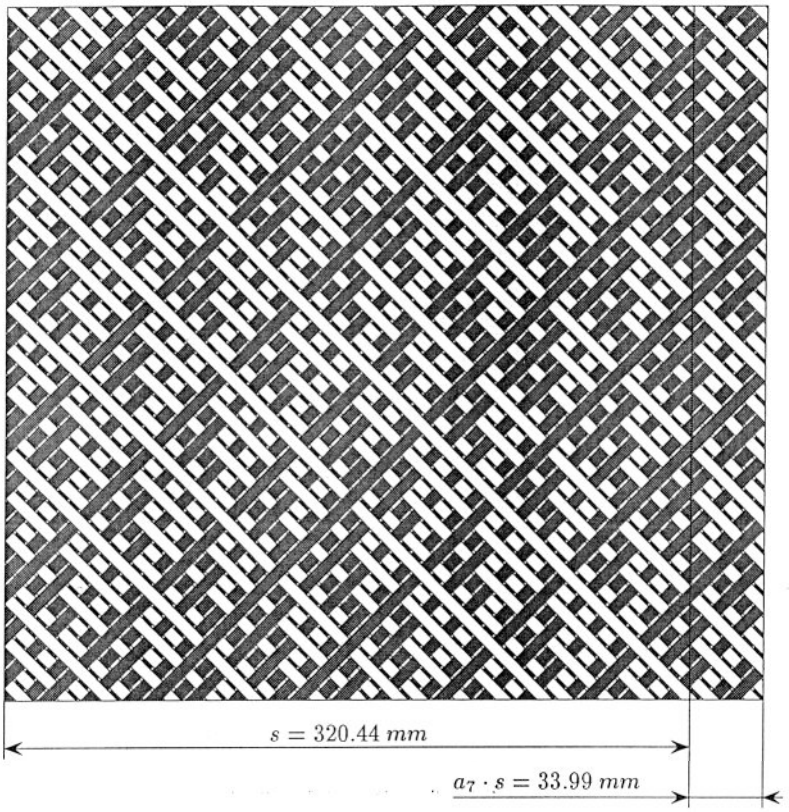
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/2



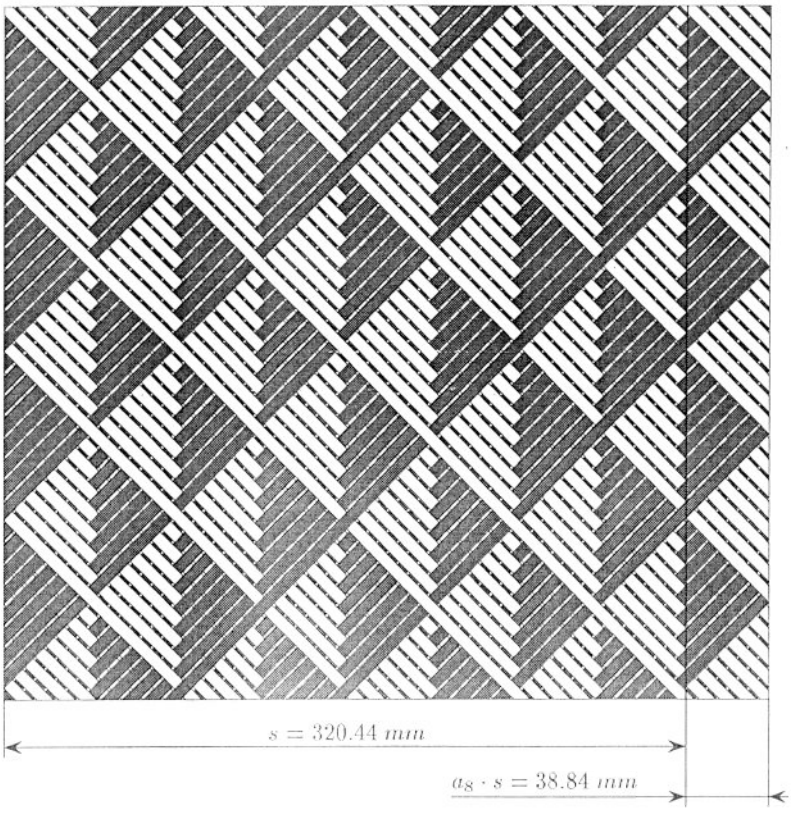
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/7



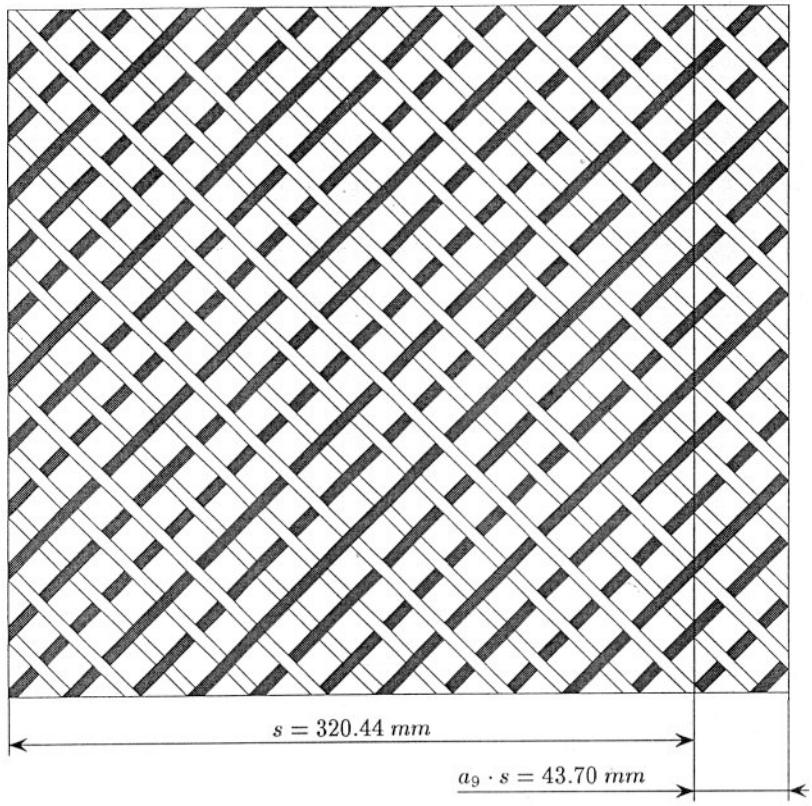
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/8



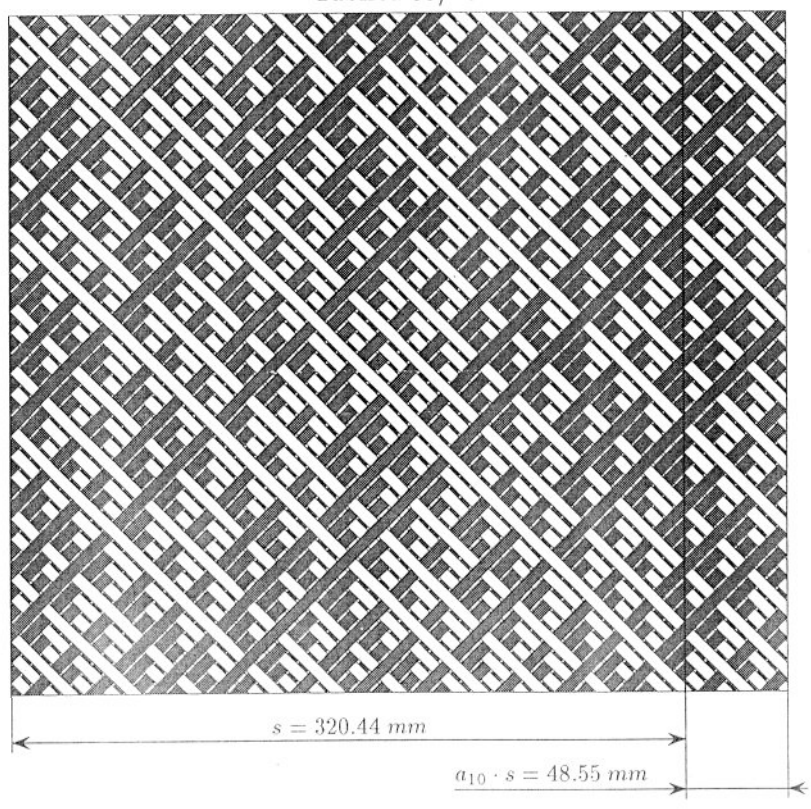
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/9



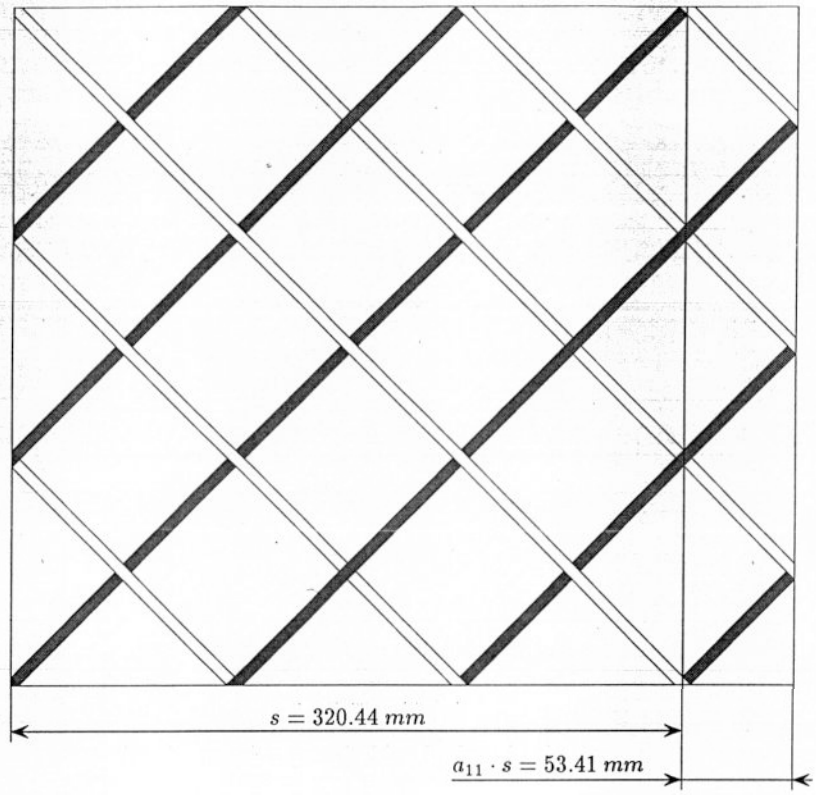
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/10



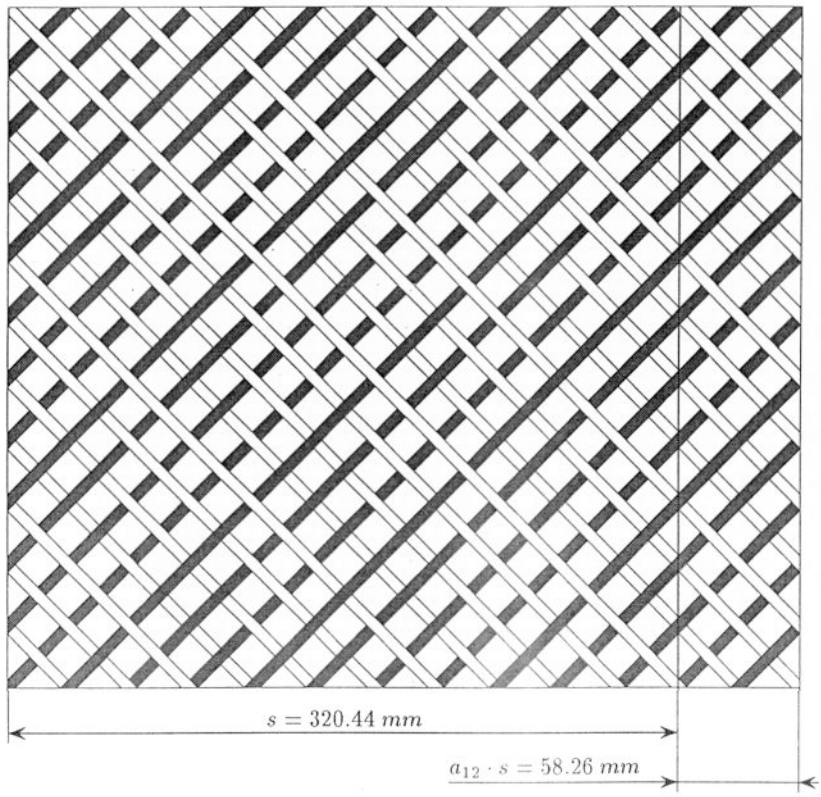
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/11



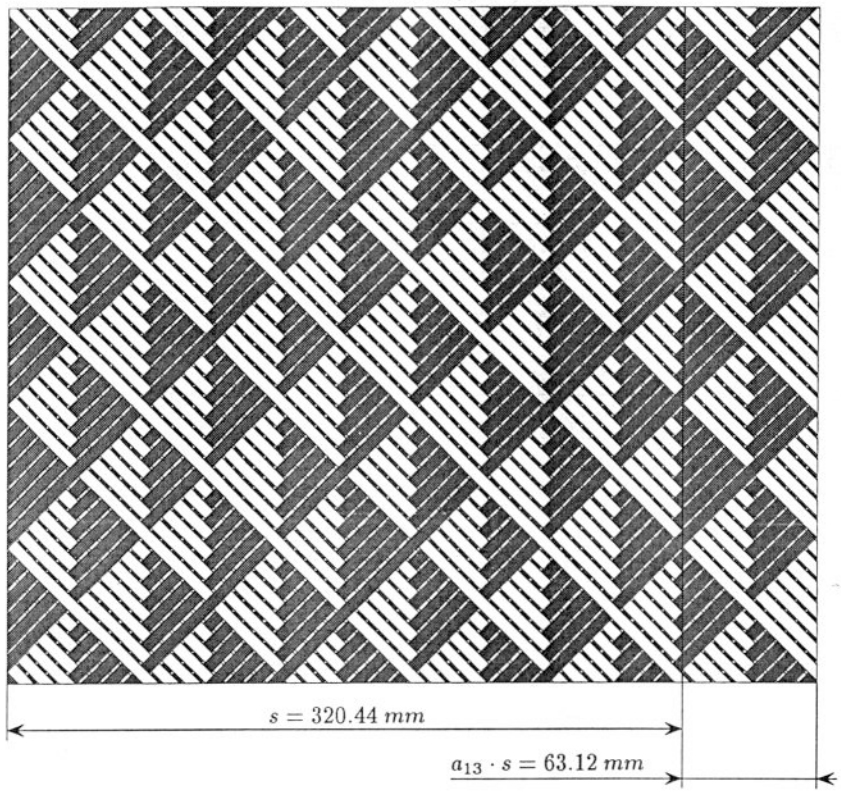
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/12



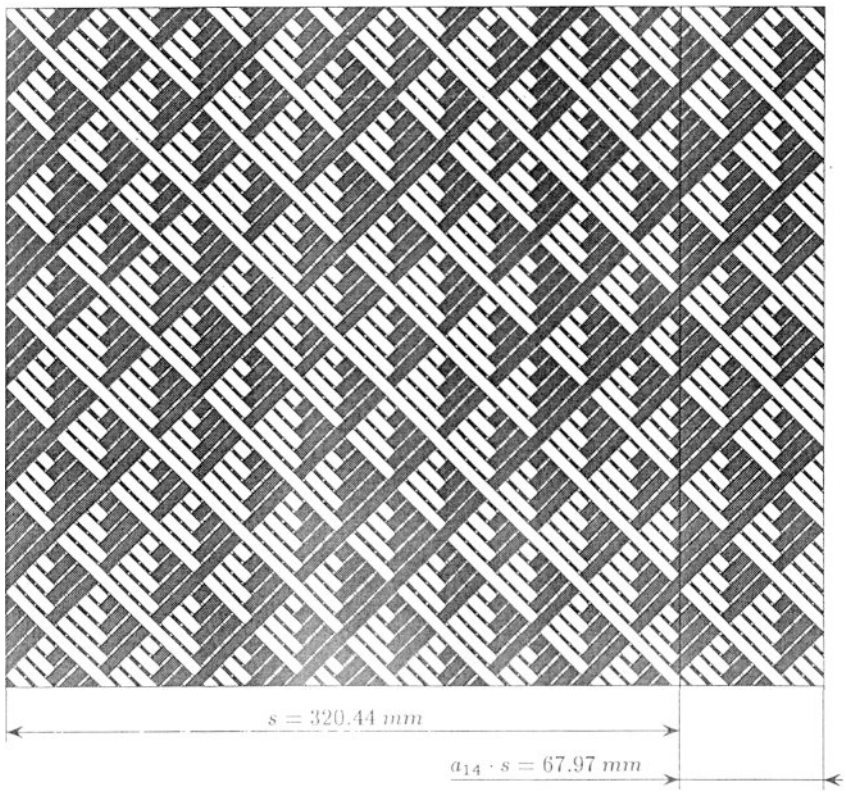
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/13



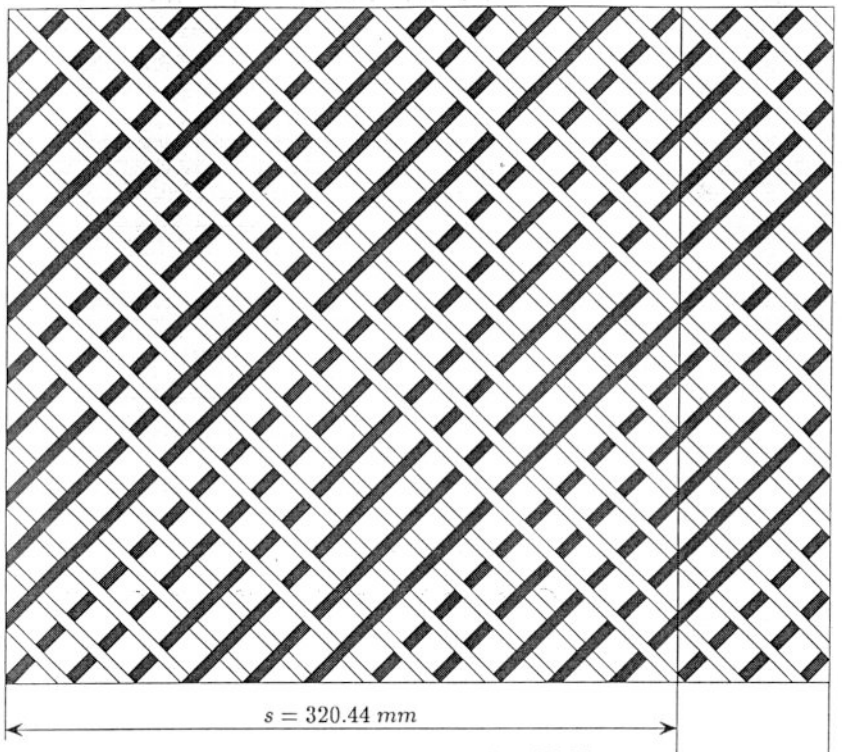
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/14



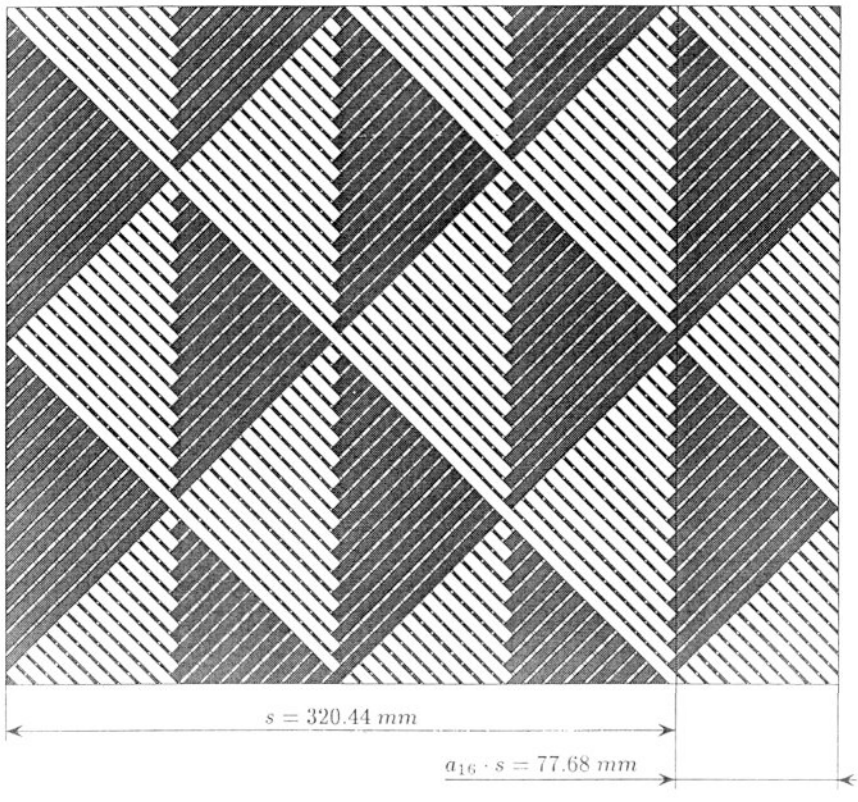
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 33/15



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

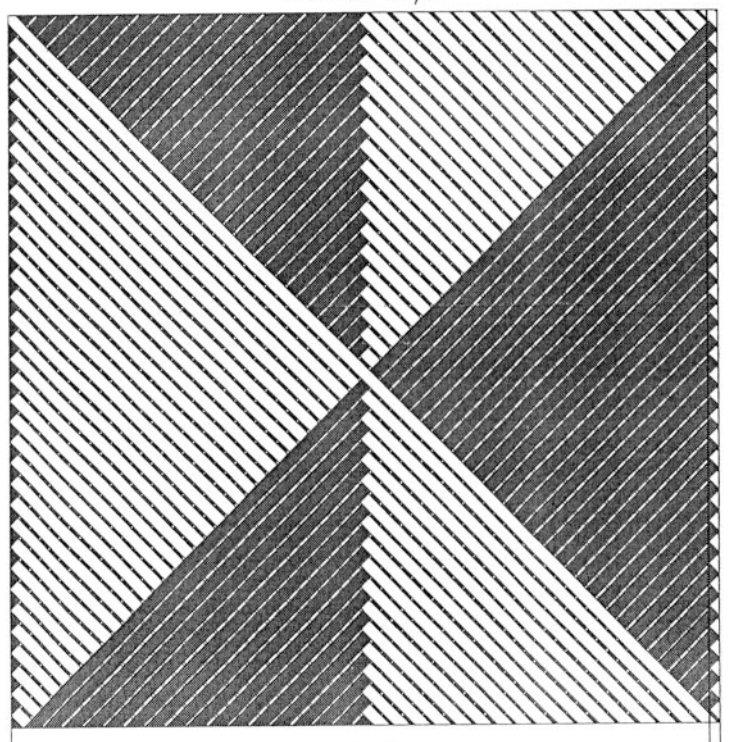
Tablica 33/16



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

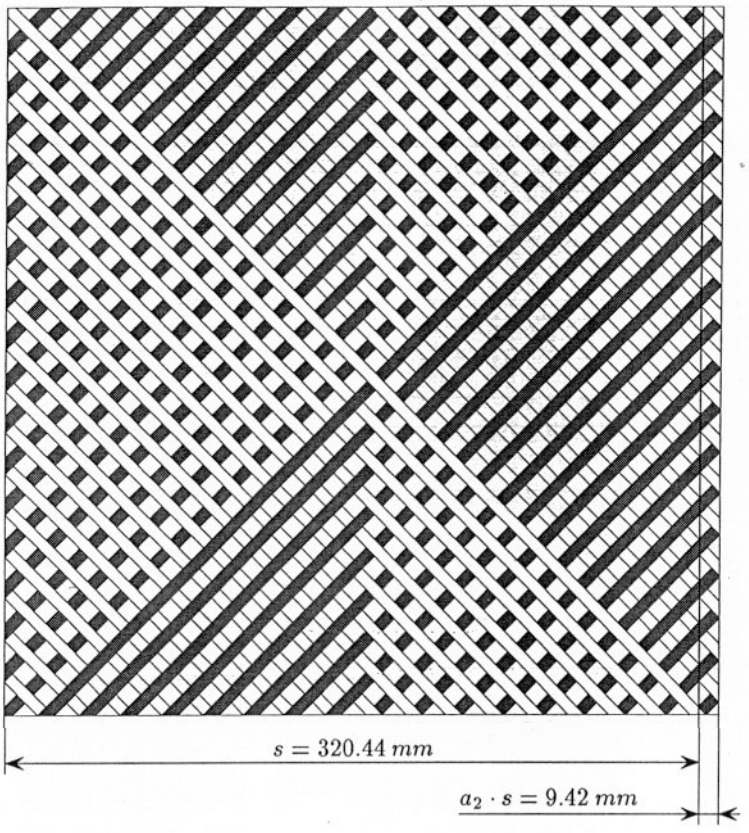
Liczba wiązek rowingu: 34																																	$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																$= Nr/(2 \cdot 34)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	1/68
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	0	16	0	17	2/68
3	23	12	1	24	13	2	25	14	3	26	15	4	27	16	5	28	17	6	29	18	7	30	19	8	31	20	9	32	21	10	33	22	11	34	3/68
4	0	9	0	1	0	10	0	2	0	11	0	3	0	12	0	4	0	13	0	5	0	14	0	6	0	15	0	7	0	16	0	8	0	17	4/68
5	7	14	21	28	1	8	15	22	29	2	9	16	23	30	3	10	17	24	31	4	11	18	25	32	5	12	19	26	33	6	13	20	27	34	5/68
6	0	6	0	12	0	1	0	7	0	13	0	2	0	8	0	14	0	3	0	9	0	15	0	4	0	10	0	16	0	5	0	11	0	17	6/68
7	5	10	15	20	25	30	1	6	11	16	21	26	31	2	7	12	17	22	27	32	3	8	13	18	23	28	33	4	9	14	19	24	29	34	7/68
8	0	13	0	9	0	5	0	1	0	14	0	10	0	6	0	2	0	15	0	11	0	7	0	3	0	16	0	12	0	8	0	4	0	17	8/68
9	19	4	23	8	27	12	31	16	1	20	5	24	9	28	13	32	17	2	21	6	25	10	29	14	33	18	3	22	7	26	11	30	15	34	9/68
10	0	7	0	14	0	4	0	11	0	1	0	8	0	15	0	5	0	12	0	2	0	9	0	16	0	6	0	13	0	3	0	10	0	17	10/68
11	31	28	25	22	19	16	13	10	7	4	1	32	29	26	23	20	17	14	11	8	5	2	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	34	11/68
12	0	3	0	6	0	9	0	12	0	15	0	1	0	4	0	7	0	10	0	13	0	16	0	2	0	5	0	8	0	11	0	14	0	17	12/68
13	21	8	29	16	3	24	11	32	19	6	27	14	1	22	9	30	17	4	25	12	33	20	7	28	15	2	23	10	31	18	5	26	13	34	13/68
14	0	5	0	10	0	15	0	3	0	8	0	13	0	1	0	6	0	11	0	16	0	4	0	9	0	14	0	2	0	7	0	12	0	17	14/68
15	25	16	7	32	23	14	5	30	21	12	3	28	19	10	1	26	17	8	33	24	15	6	31	22	13	4	29	20	11	2	27	18	9	34	15/68
16	0	15	0	13	0	11	0	9	0	7	0	5	0	3	0	1	0	16	0	14	0	12	0	10	0	8	0	6	0	4	0	2	0	17	16/68
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	17/68

Tablica 34/1



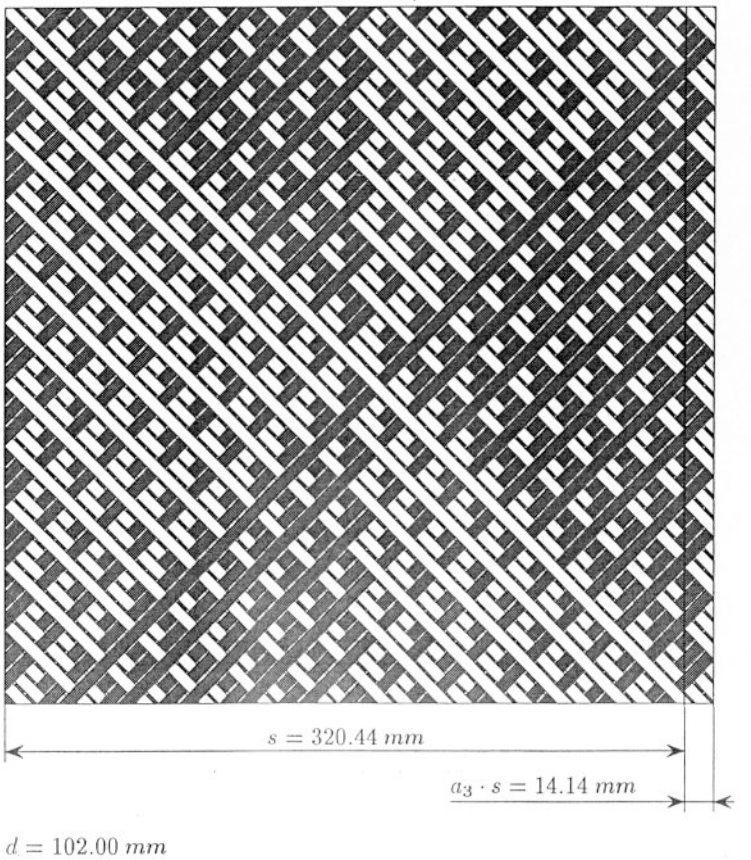
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/2



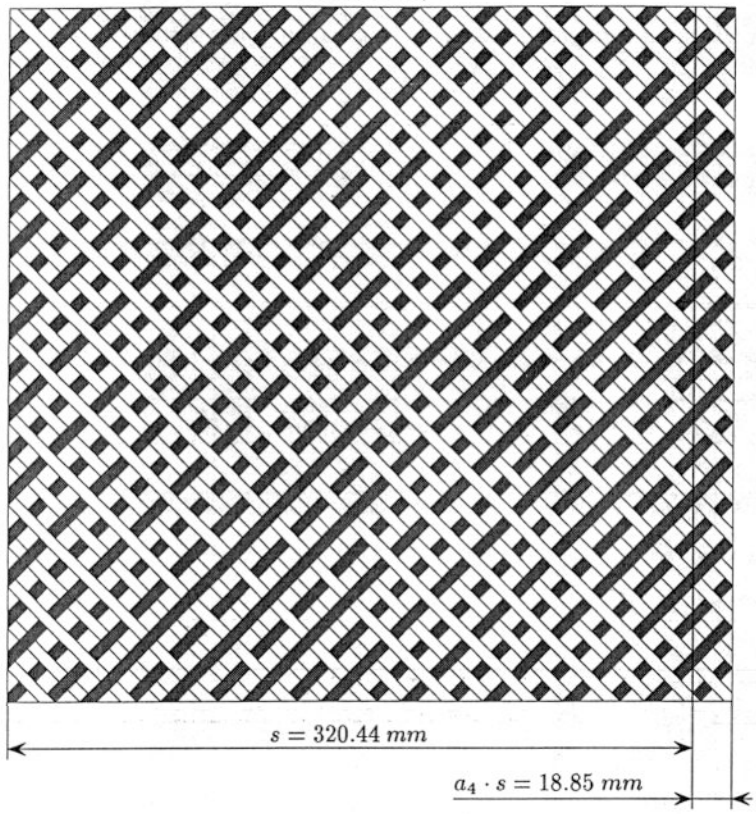
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/3



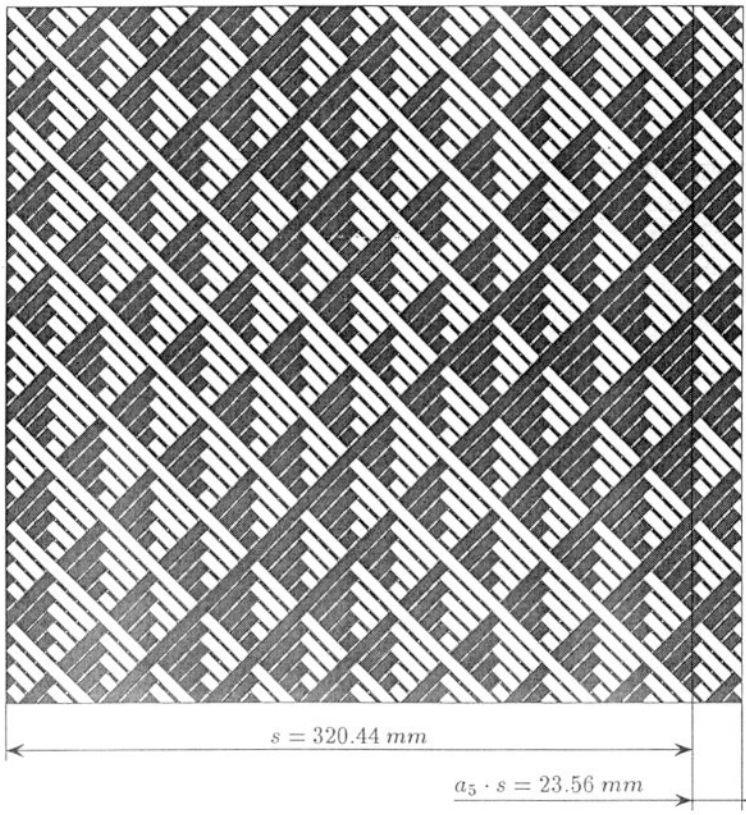
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/4



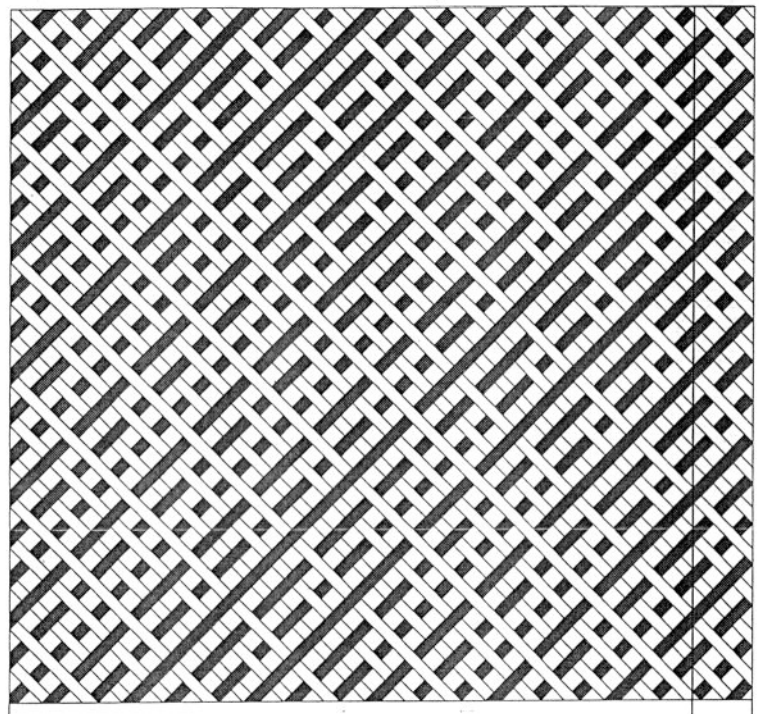
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/5



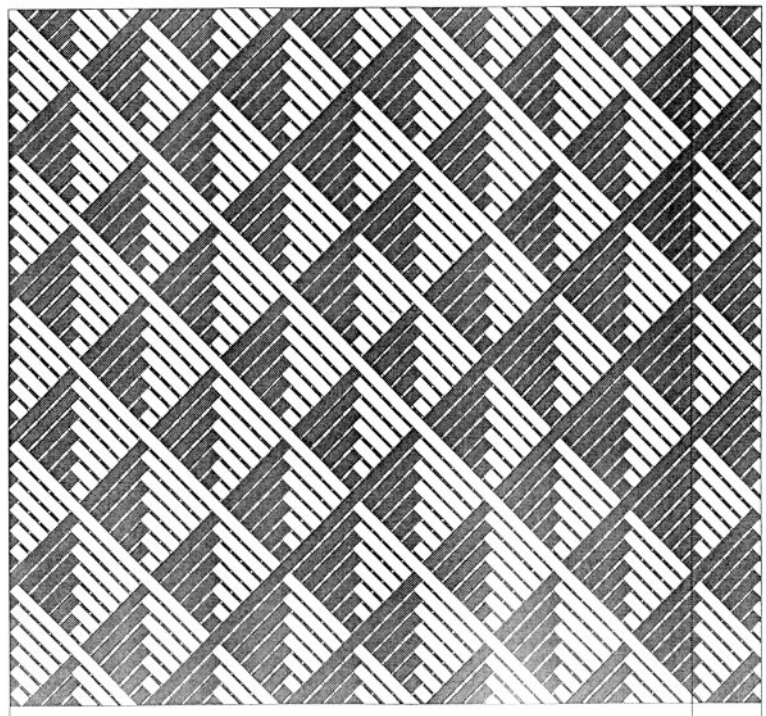
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/6



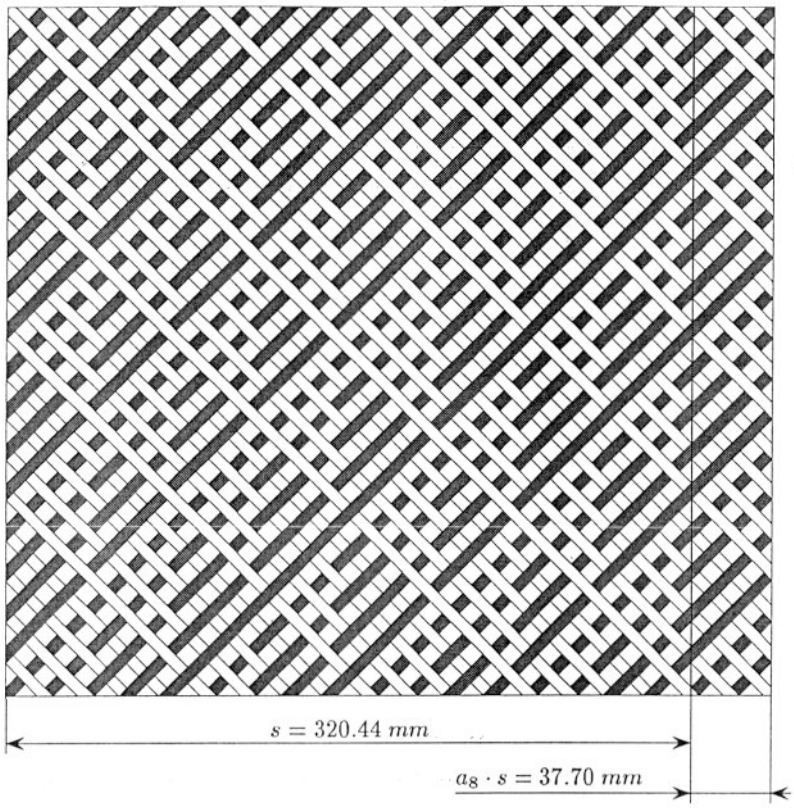
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/7



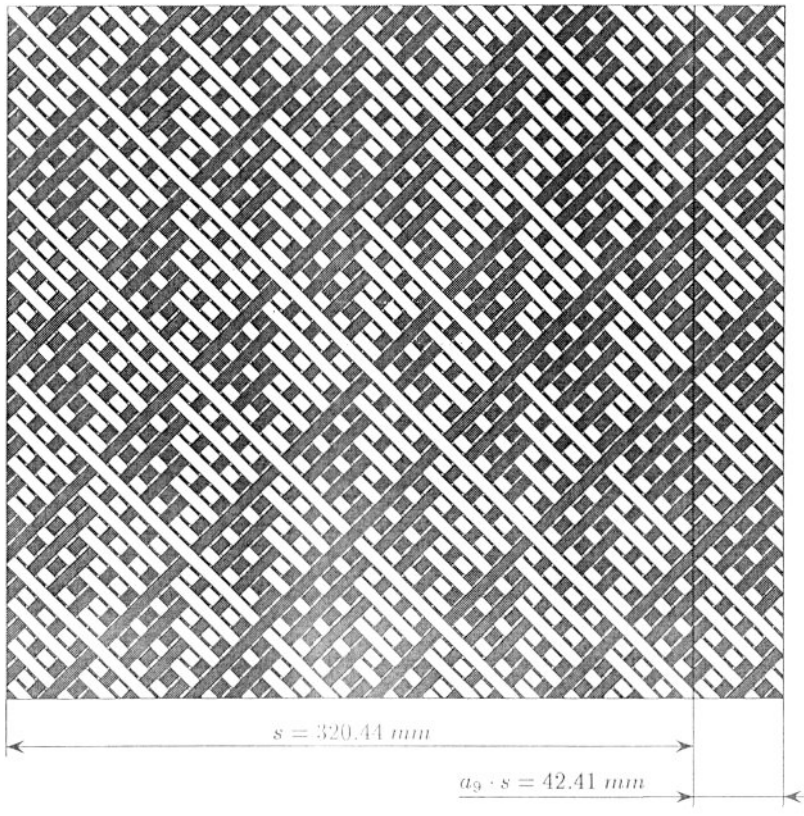
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/8



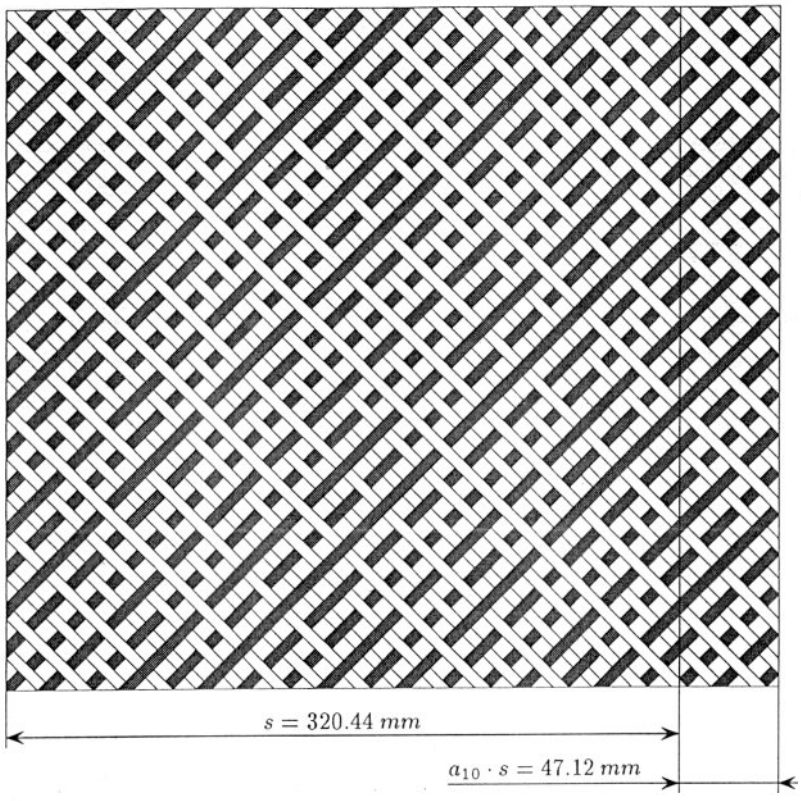
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/9



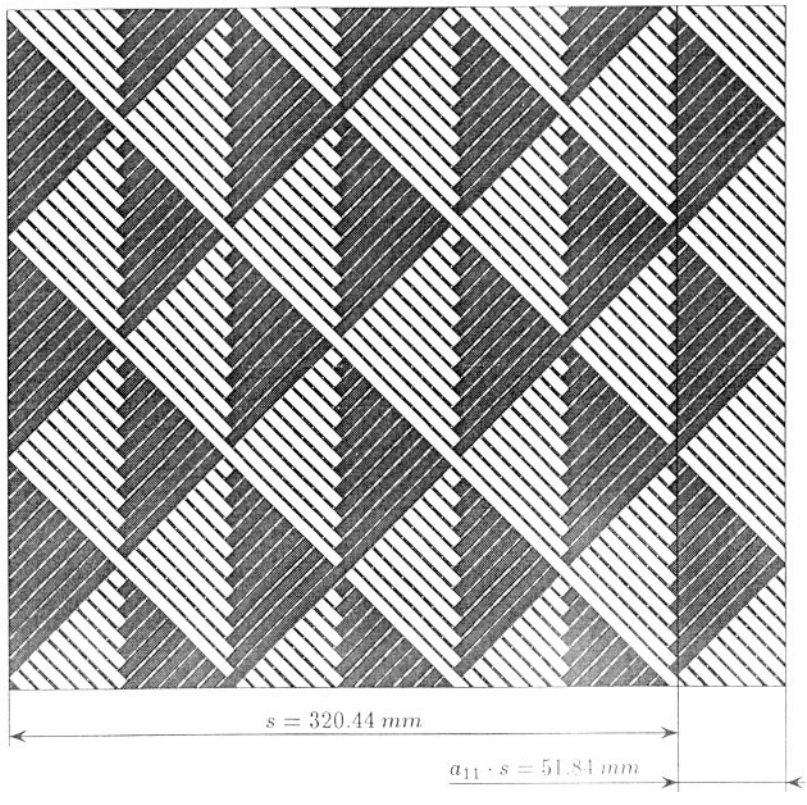
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/10



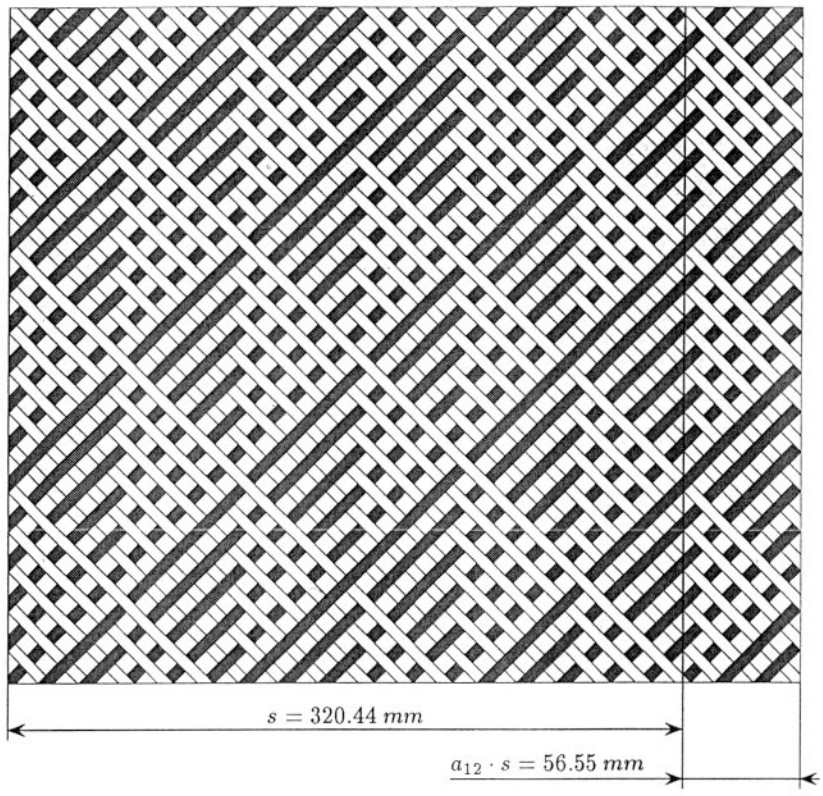
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/11



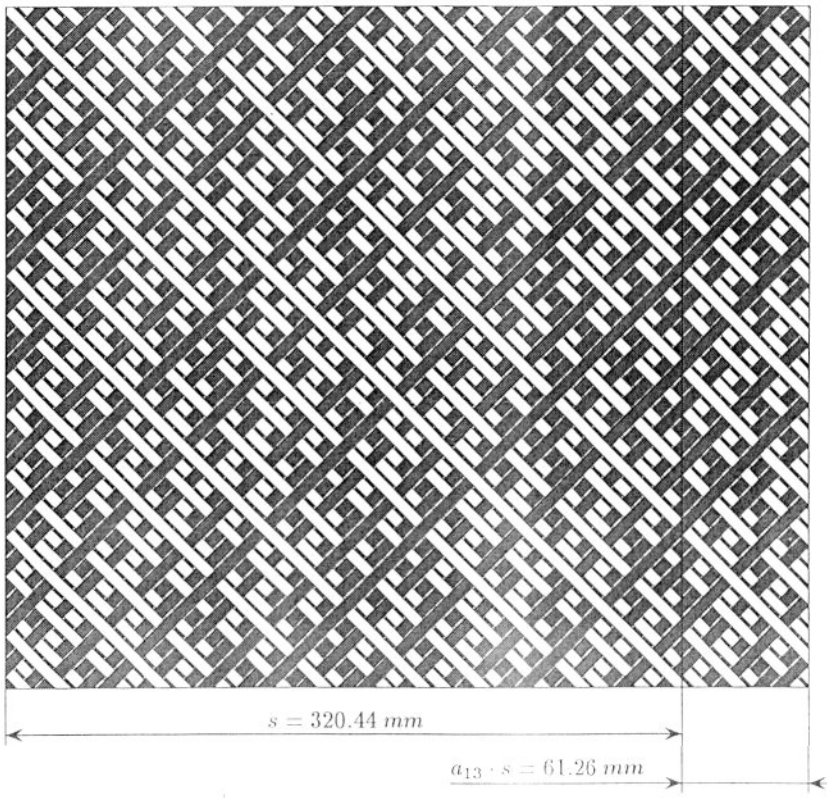
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/12



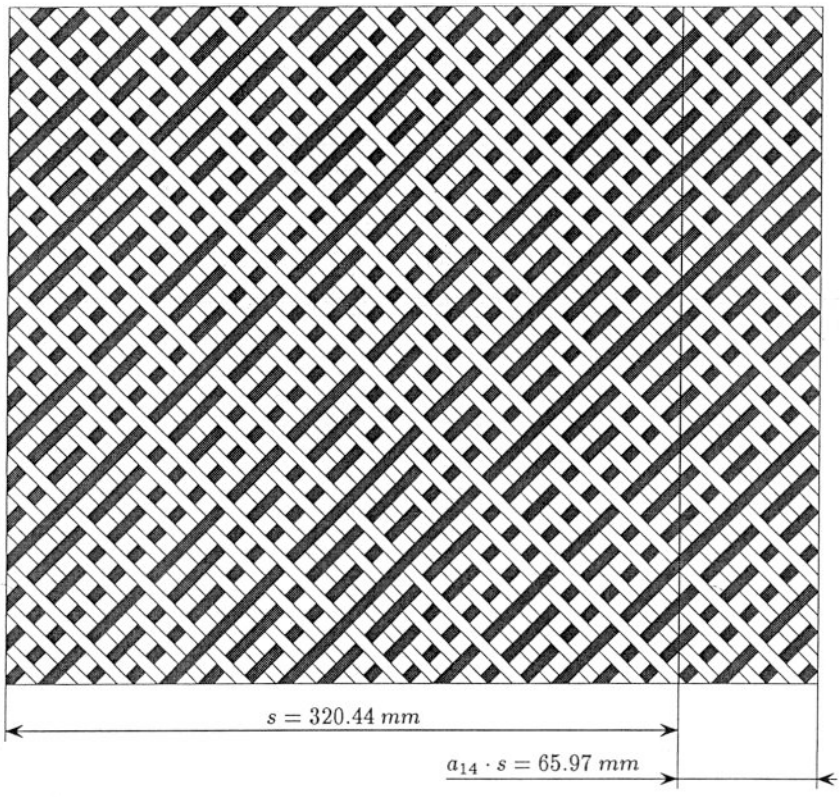
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/13



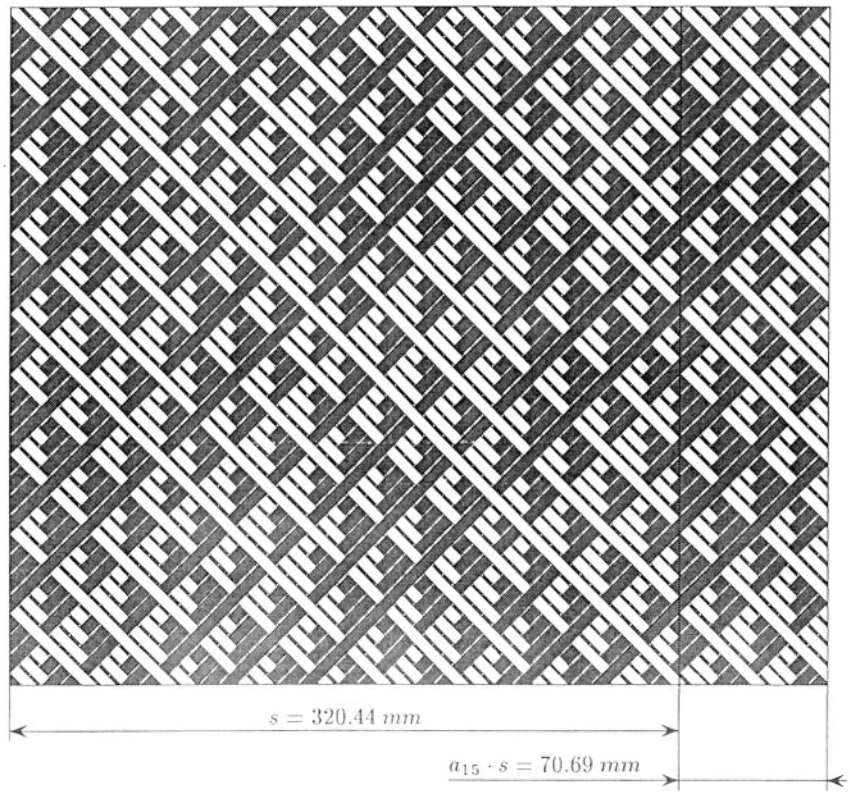
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/14



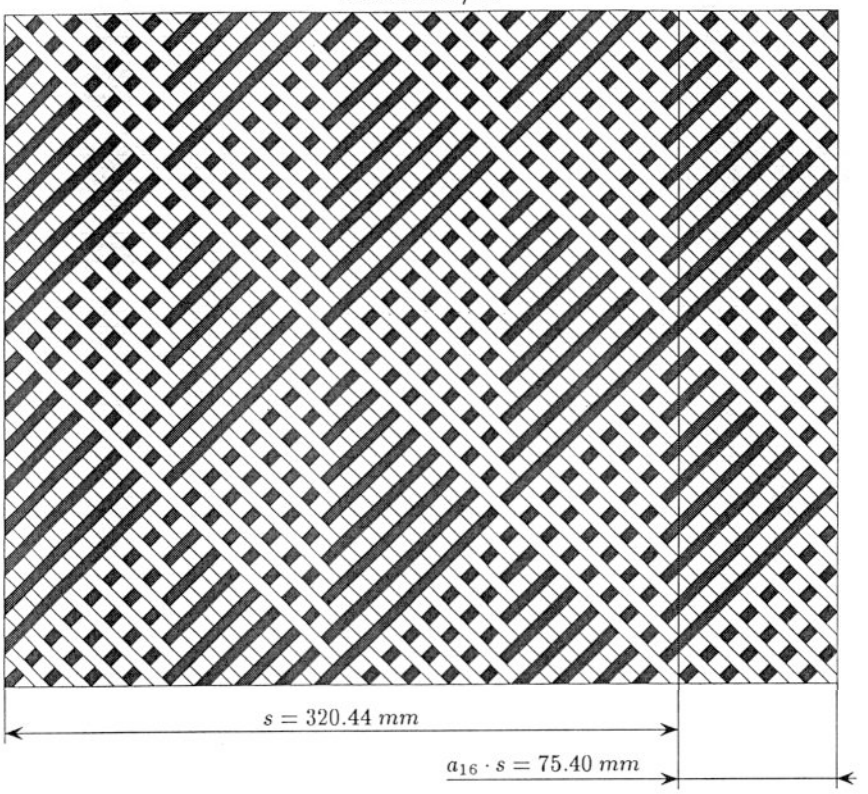
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/15



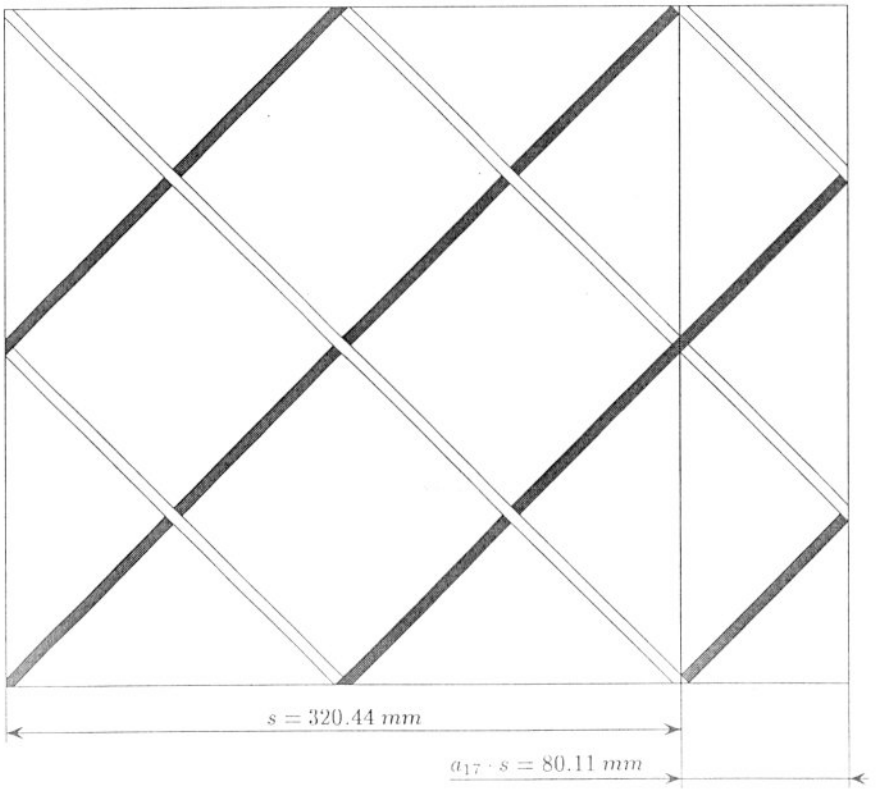
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 34/16



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

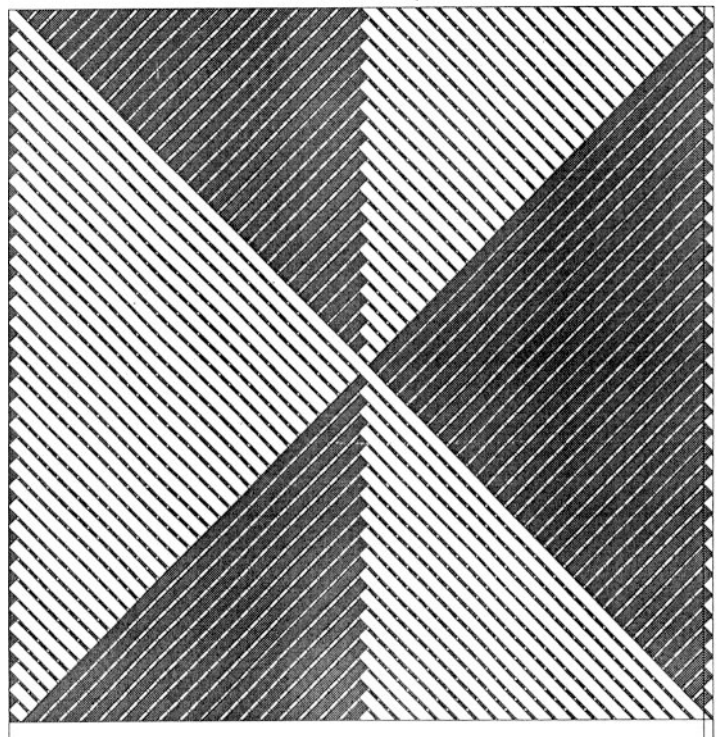
Tablica 34/17



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

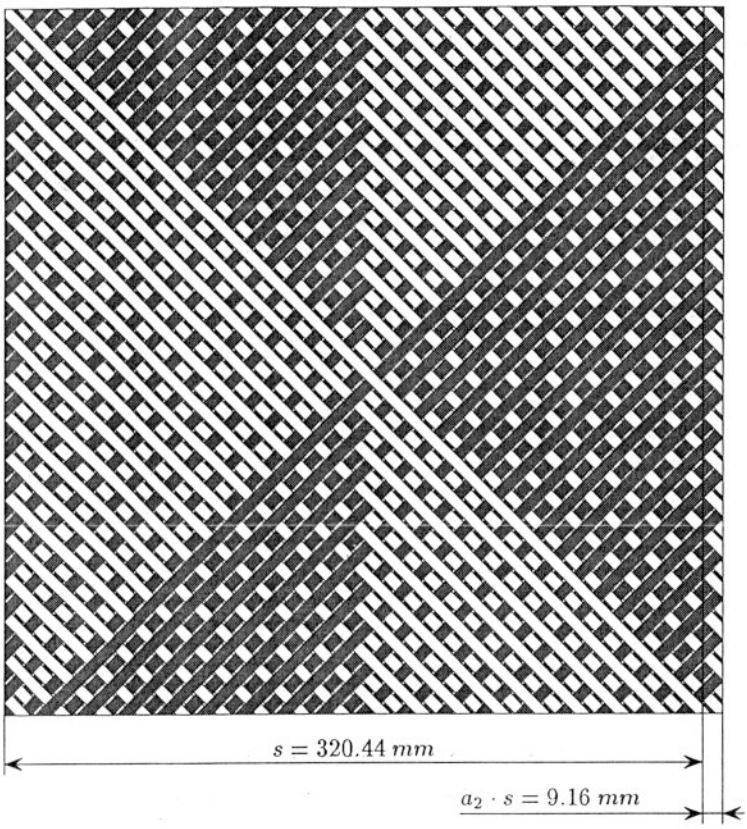
Liczba wiązek rowingu: 35																																		$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																		$= Nr/(2 \cdot 35)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	1/70
2	18	1	19	2	20	3	21	4	22	5	23	6	24	7	25	8	26	9	27	10	28	11	29	12	30	13	31	14	32	15	33	16	34	17	35	2/70
3	12	24	1	13	25	2	14	26	3	15	27	4	16	28	5	17	29	6	18	30	7	19	31	8	20	32	9	21	33	10	22	34	11	23	35	3/70
4	9	18	27	1	10	19	28	2	11	20	29	3	12	21	30	4	13	22	31	5	14	23	32	6	15	24	33	7	16	25	34	8	17	26	35	4/70
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	5	0	0	0	0	6	0	0	0	0	7	5/70
6	6	12	18	24	30	1	7	13	19	25	31	2	8	14	20	26	32	3	9	15	21	27	33	4	10	16	22	28	34	5	11	17	23	29	35	6/70
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	5	7/70
8	22	9	31	18	5	27	14	1	23	10	32	19	6	28	15	2	24	11	33	20	7	29	16	3	25	12	34	21	8	30	17	4	26	13	35	8/70
9	4	8	12	16	20	24	28	32	1	5	9	13	17	21	25	29	33	2	6	10	14	18	22	26	30	34	3	7	11	15	19	23	27	31	35	9/70
10	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	6	0	0	0	0	3	0	0	0	0	7	10/70
11	16	32	13	29	10	26	7	23	4	20	1	17	33	14	30	11	27	8	24	5	21	2	18	34	15	31	12	28	9	25	6	22	3	19	35	11/70
12	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	12/70
13	27	19	11	3	30	22	14	6	33	25	17	9	1	28	20	12	4	31	23	15	7	34	26	18	10	2	29	21	13	5	32	24	16	8	35	13/70
14	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	5	14/70
15	0	0	0	0	5	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	6	0	0	0	0	4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	7	15/70
16	11	22	33	9	20	31	7	18	29	5	16	27	3	14	25	1	12	23	34	10	21	32	8	19	30	6	17	28	4	15	26	2	13	24	35	16/70
17	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	35	17/70

Tablica 35/1



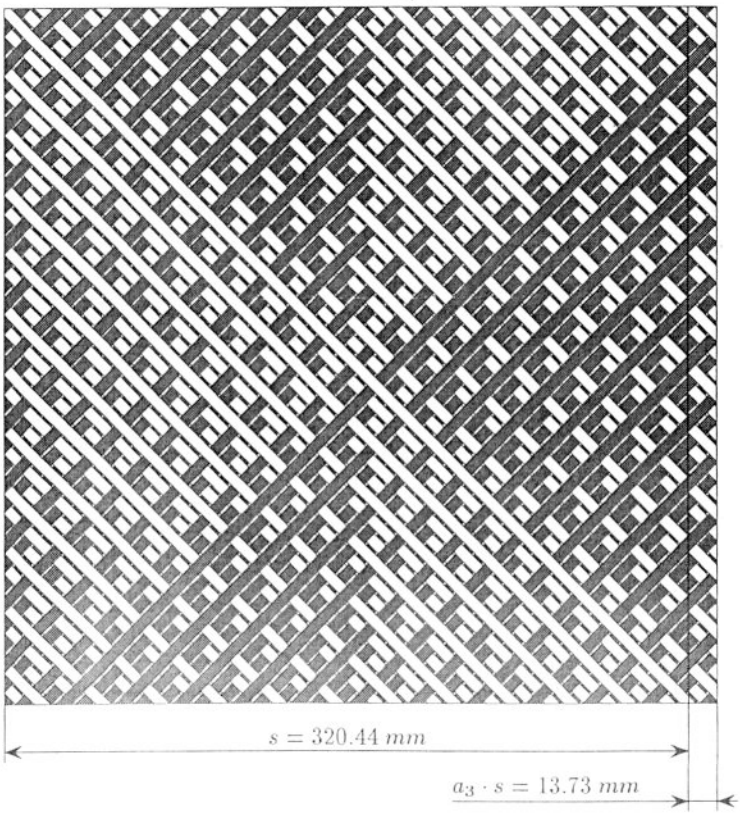
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{\circ}$

Tablica 35/2



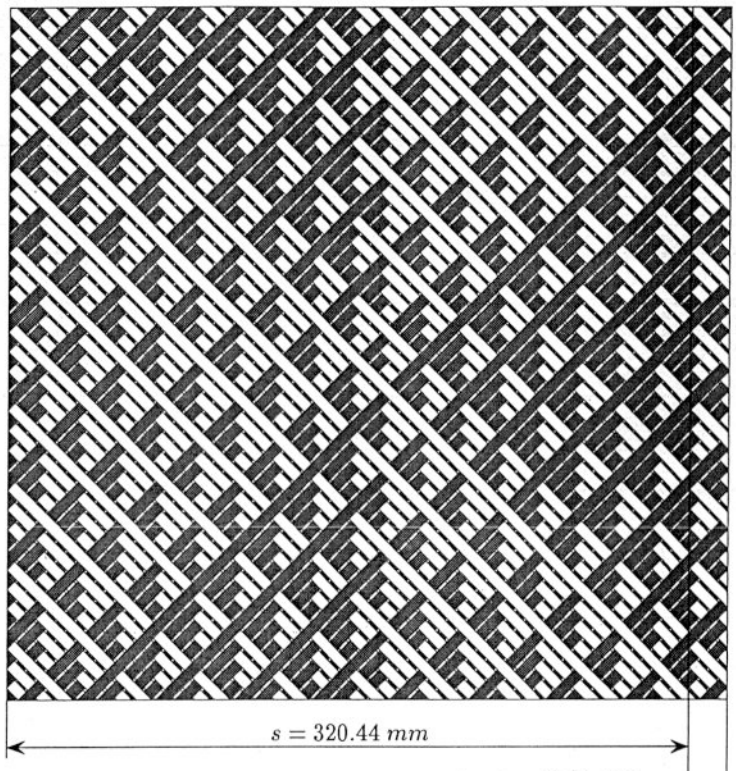
$d = 102.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/3



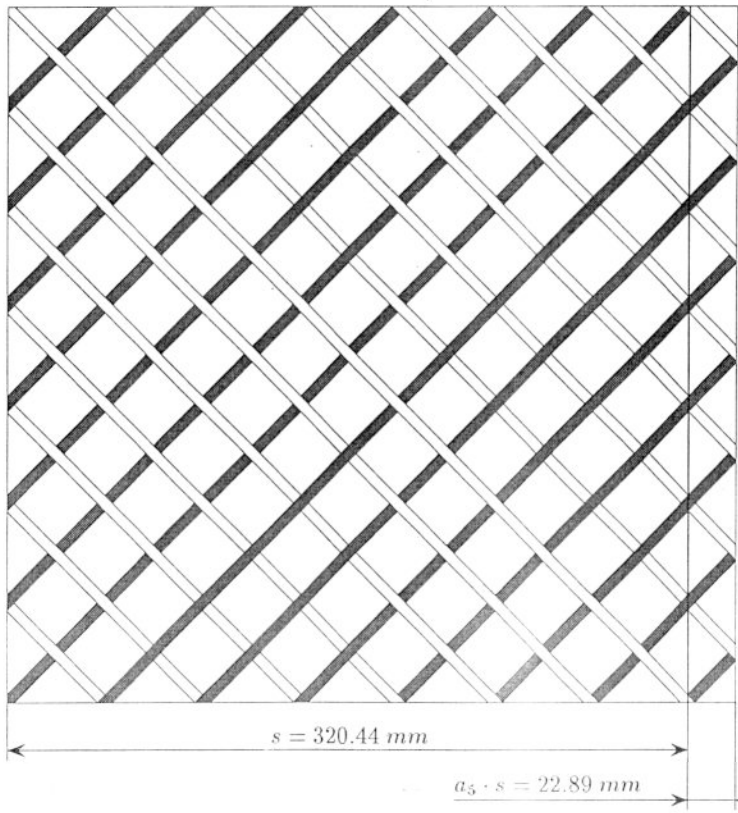
$d = 102.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/4



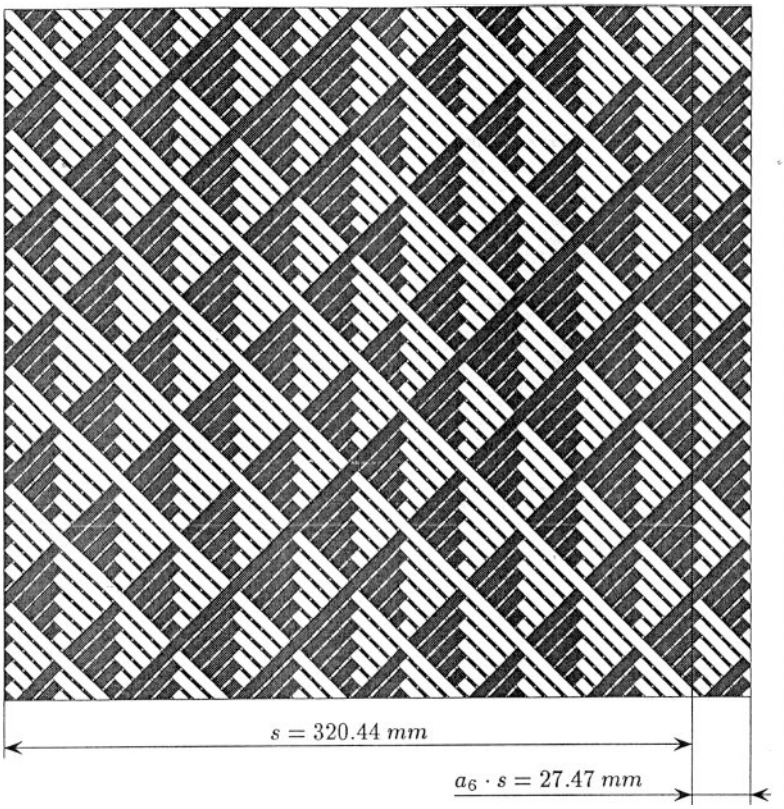
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{\circ}$

Tablica 35/5



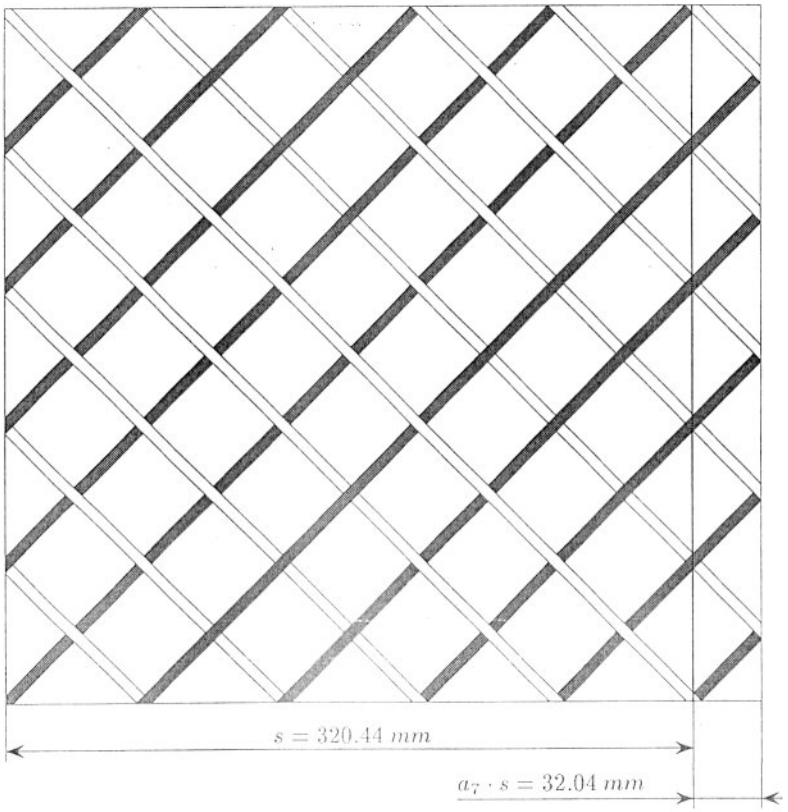
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{\circ}$

Tablica 35/6



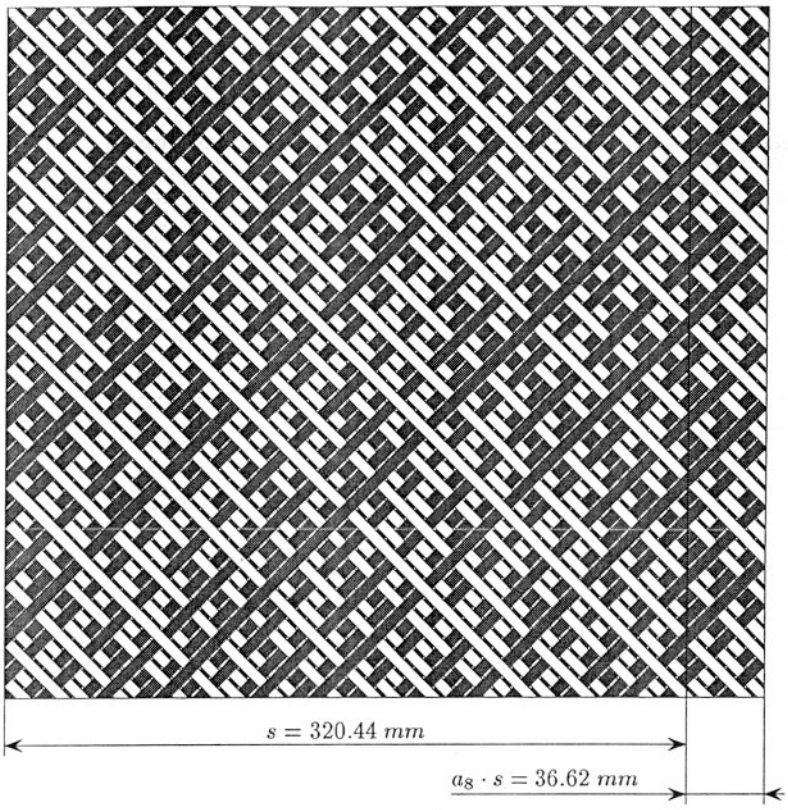
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/7



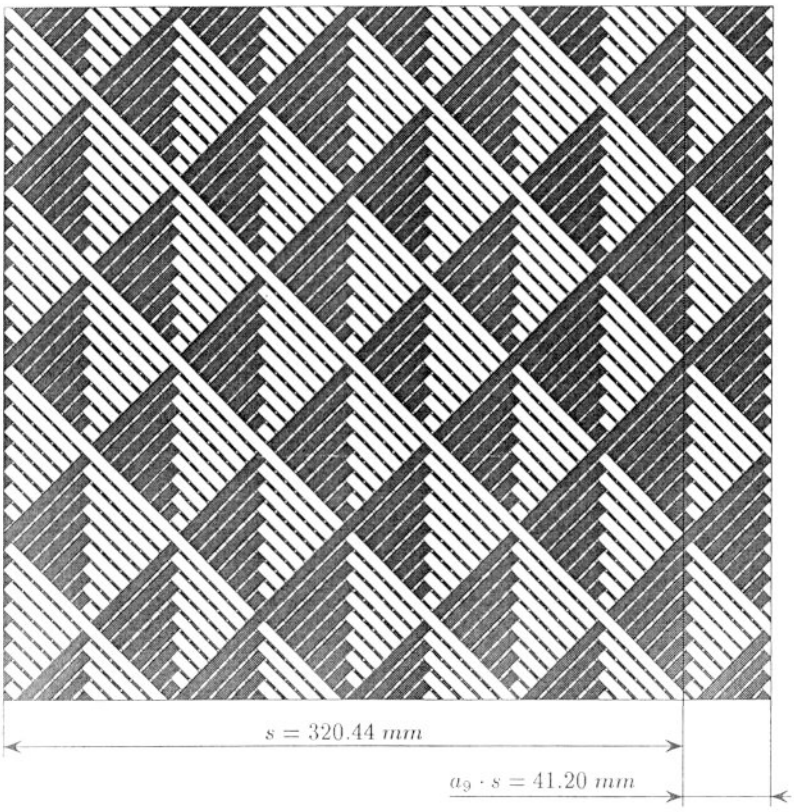
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/8



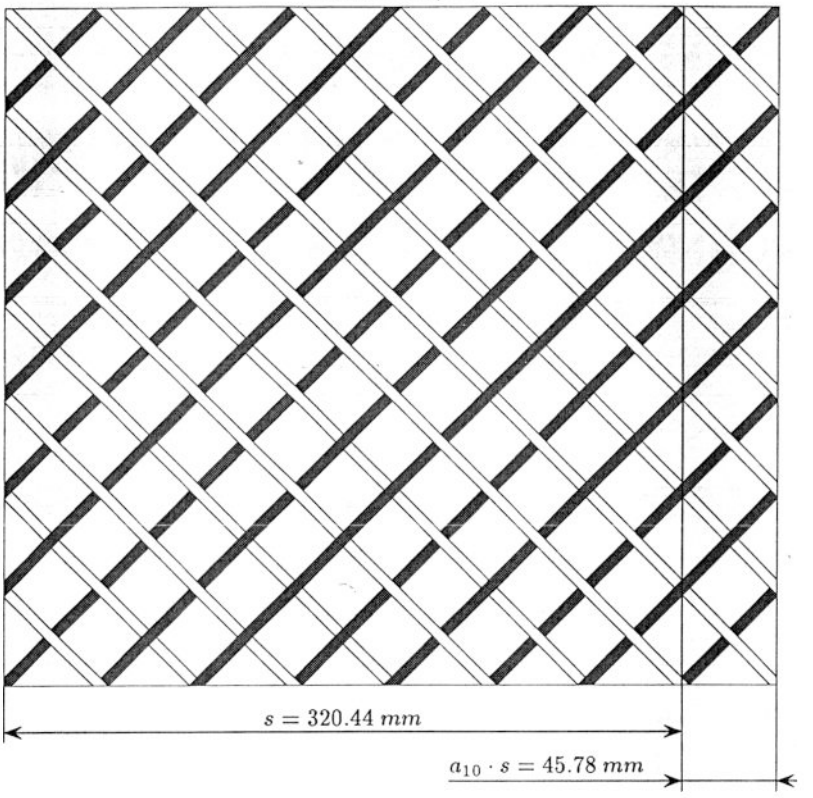
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 35/9



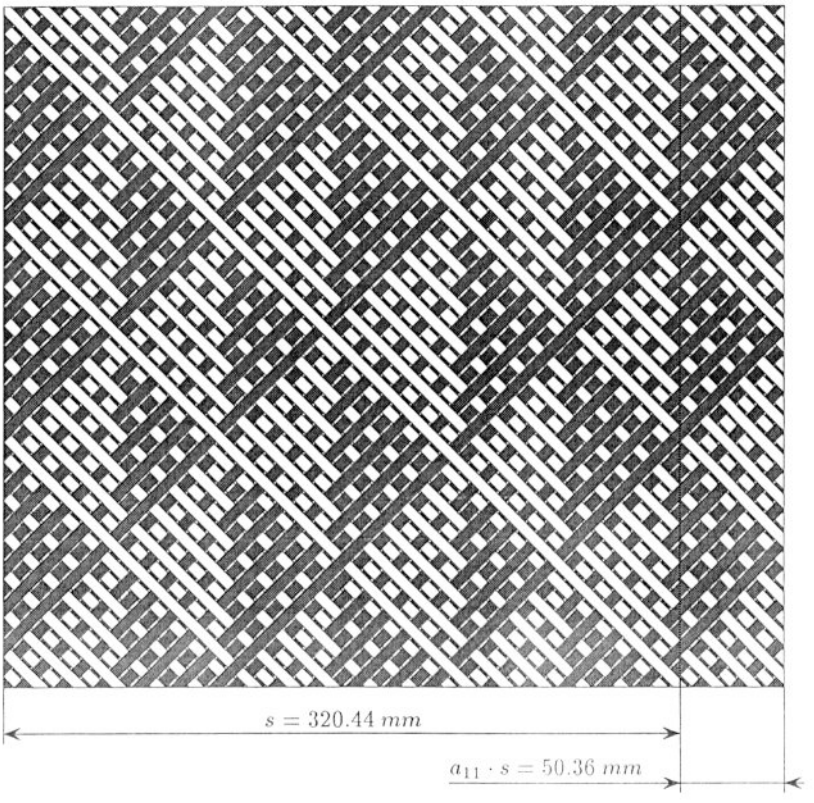
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^o$

Tablica 35/10



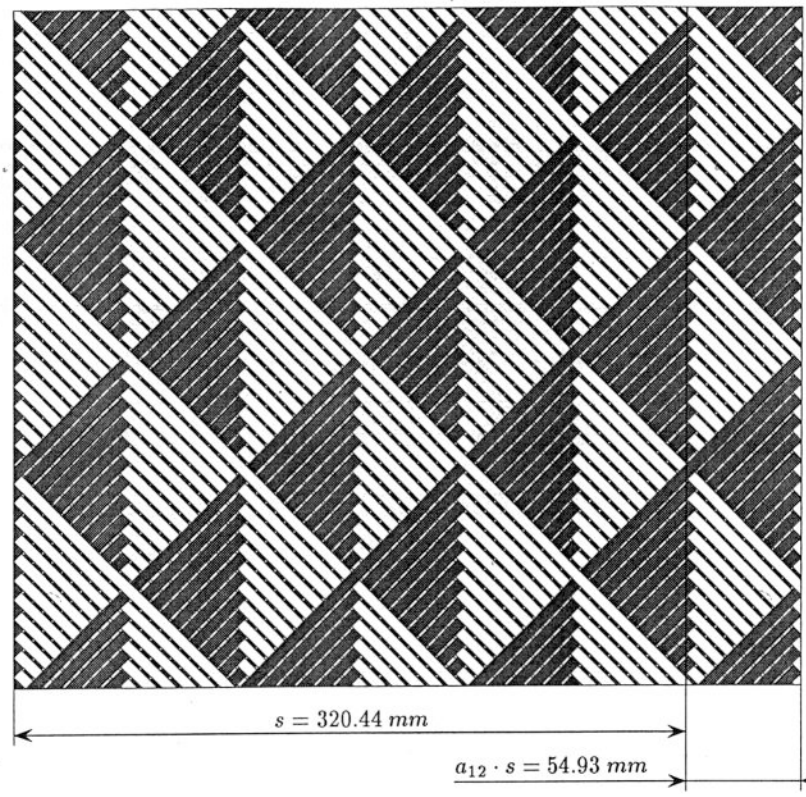
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/11



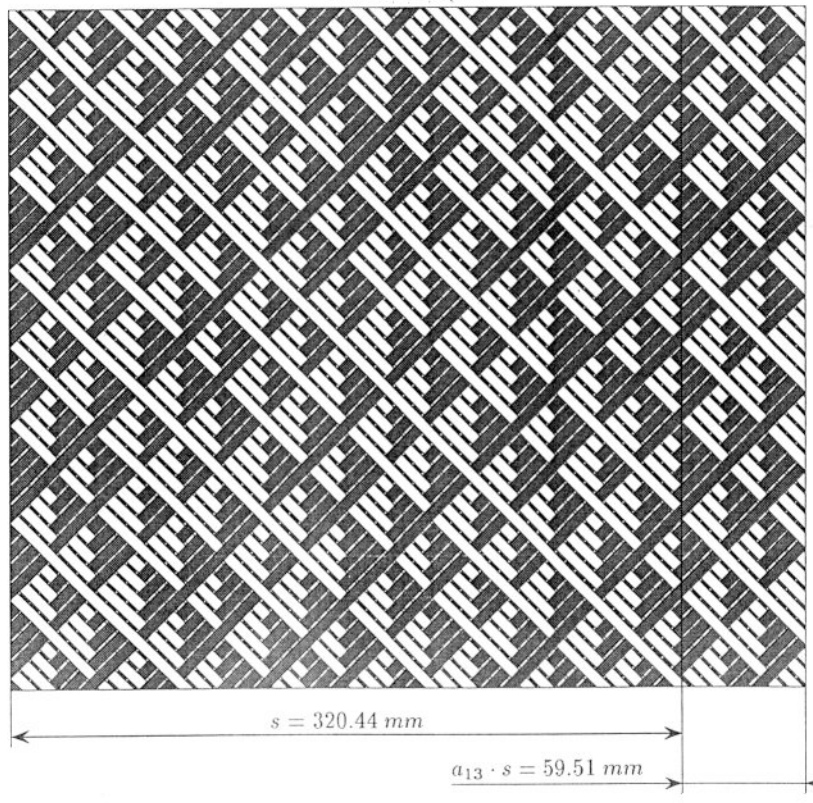
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/12



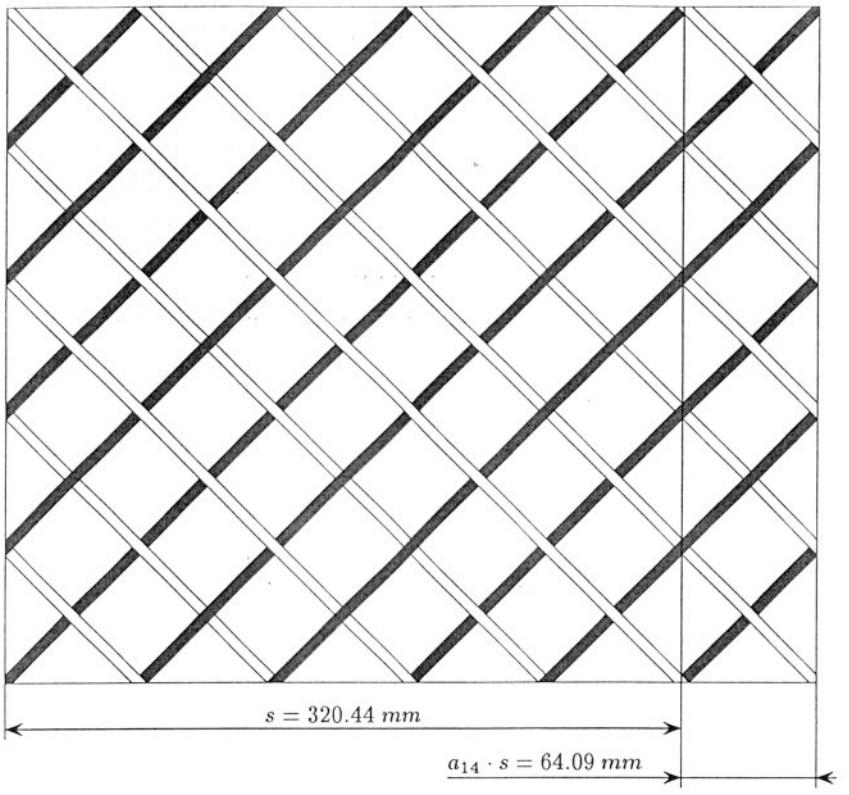
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/13



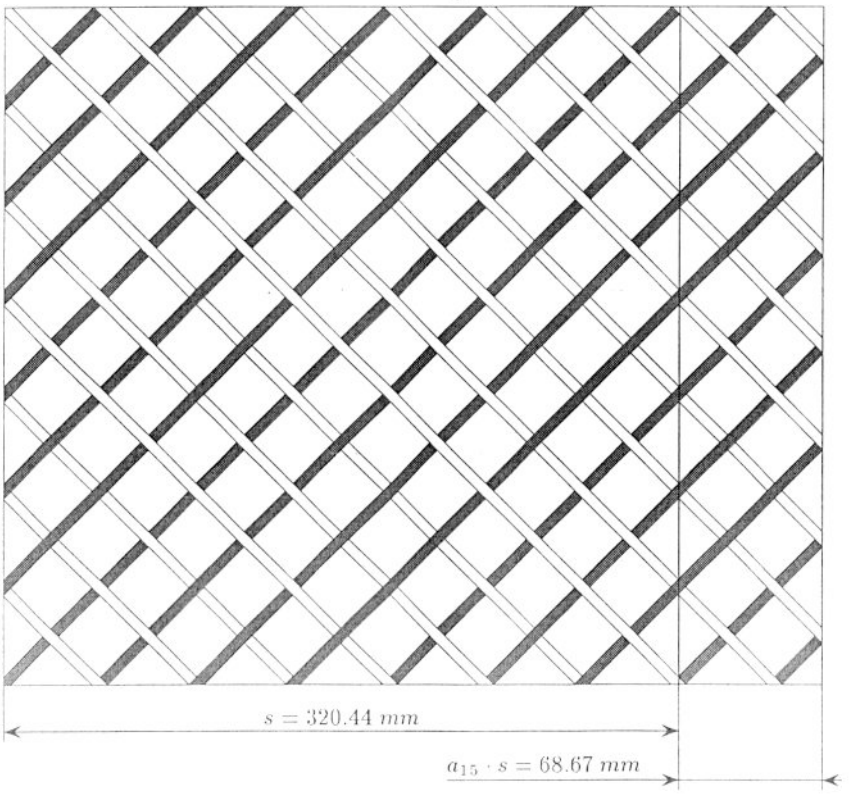
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/14



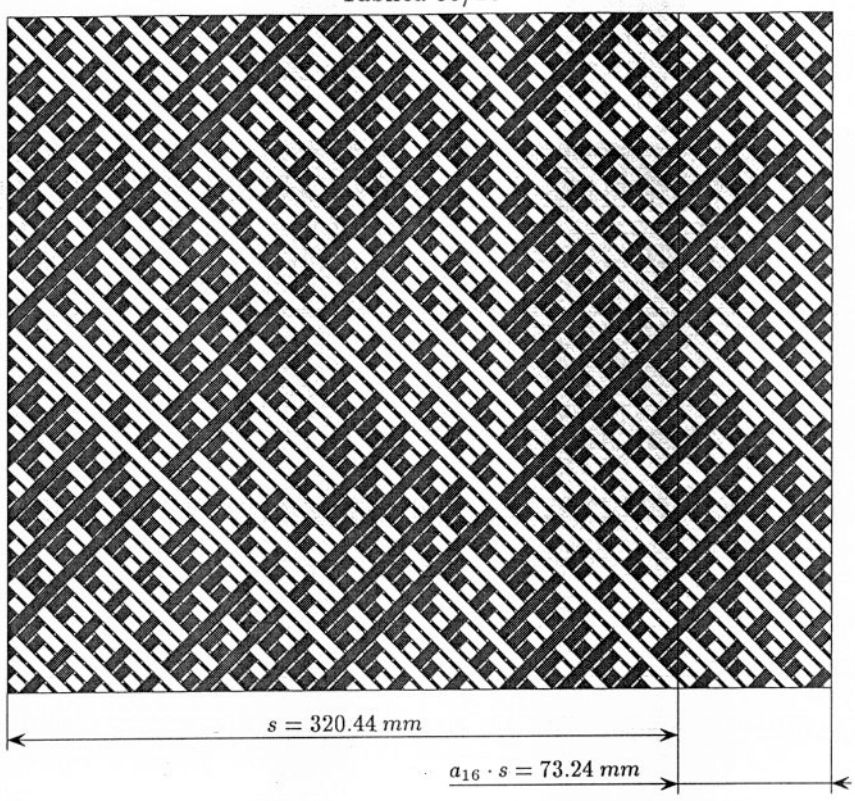
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/15



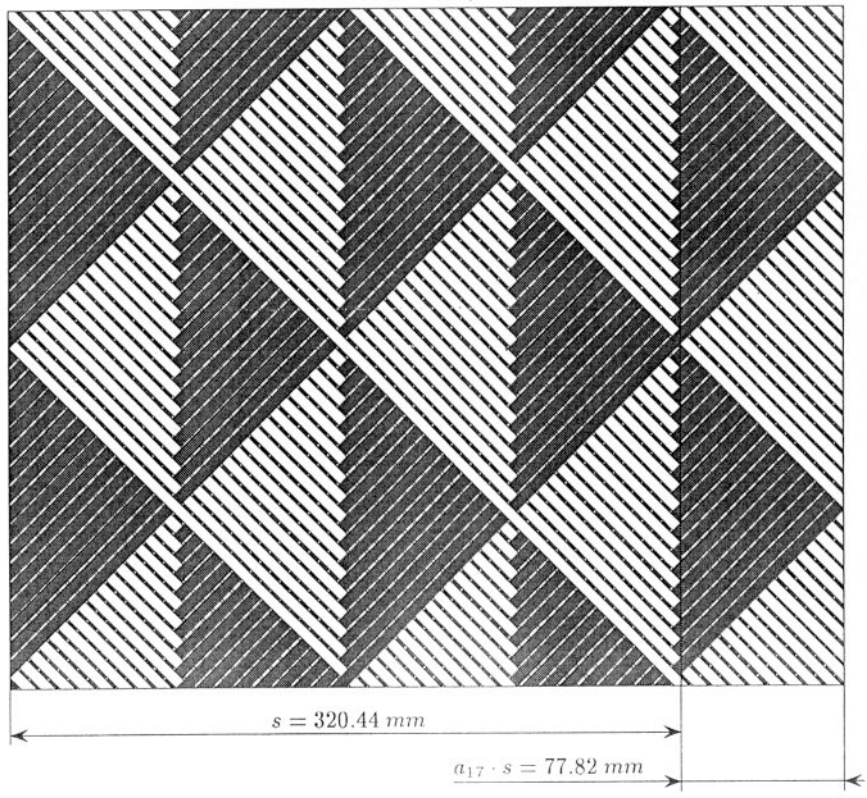
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 35/16



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

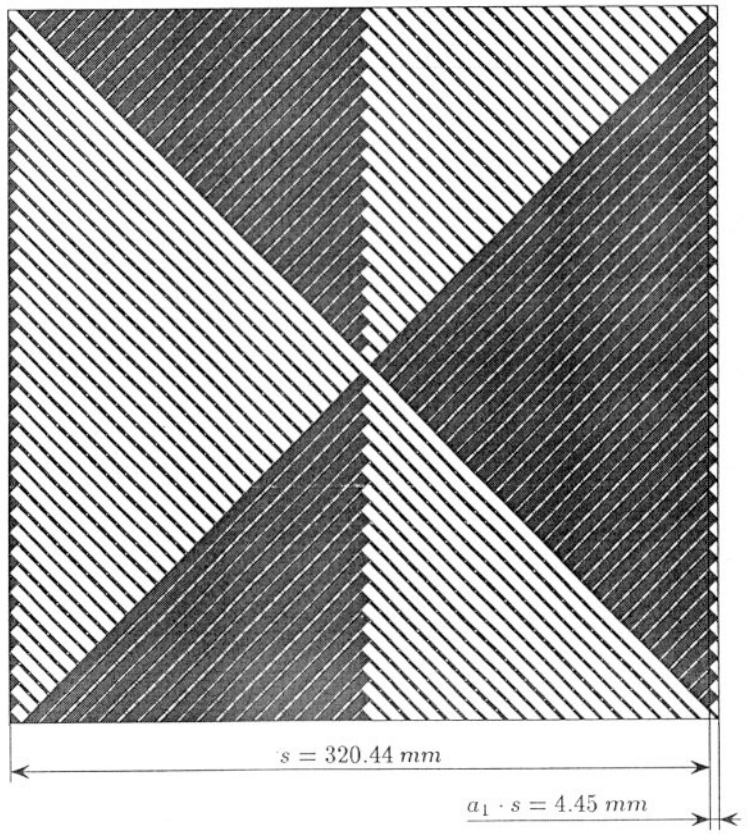
Tablica 35/17



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

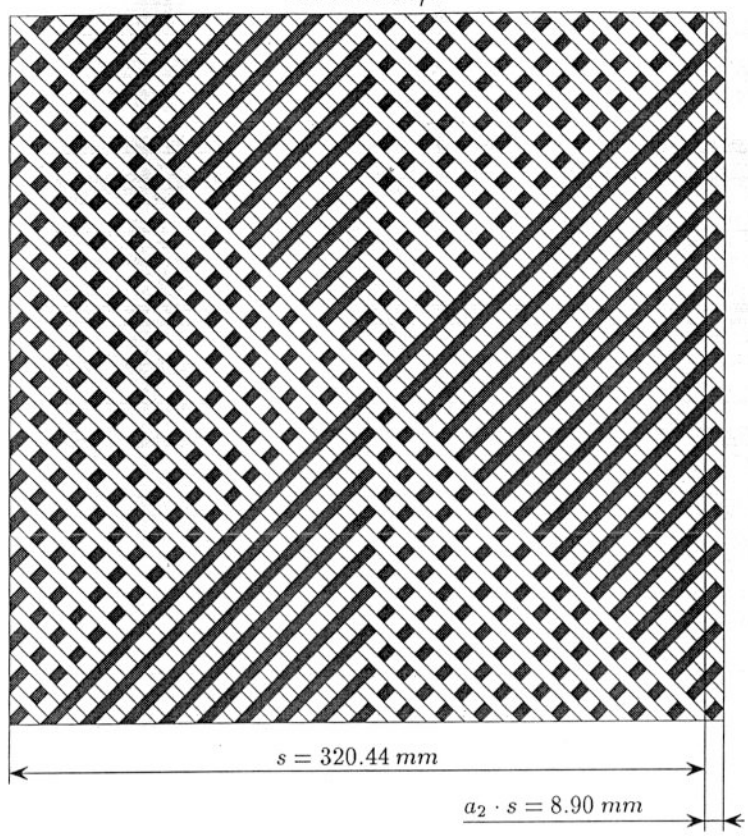
Liczba wiązek rowingu: 36																																			$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																		$= Nr/(2 \cdot 36)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	1/72
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	0	16	0	17	0	18	2/72
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	0	0	9	0	0	10	0	0	11	0	0	12	3/72
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0	5	0	0	0	6	0	0	0	7	0	0	0	8	0	0	0	9	4/72
5	29	22	15	8	1	30	23	16	9	2	31	24	17	10	3	32	25	18	11	4	33	26	19	12	5	34	27	20	13	6	35	28	21	14	7	36	5/72
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	6	6/72
7	31	26	21	16	11	6	1	32	27	22	17	12	7	2	33	28	23	18	13	8	3	34	29	24	19	14	9	4	35	30	25	20	15	10	5	36	7/72
8	0	0	0	5	0	0	0	1	0	0	0	6	0	0	0	2	0	0	0	7	0	0	0	3	0	0	0	8	0	0	0	4	0	0	0	9	8/72
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	9/72
10	0	11	0	4	0	15	0	8	0	1	0	12	0	5	0	16	0	9	0	2	0	13	0	6	0	17	0	10	0	3	0	14	0	7	0	18	10/72
11	23	10	33	20	7	30	17	4	27	14	1	24	11	34	21	8	31	18	5	28	15	2	25	12	35	22	9	32	19	6	29	16	3	26	13	36	11/72
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	12/72
13	25	14	3	28	17	6	31	20	9	34	23	12	1	26	15	4	29	18	7	32	21	10	35	24	13	2	27	16	5	30	19	8	33	22	11	36	13/72
14	0	13	0	8	0	3	0	16	0	11	0	6	0	1	0	14	0	9	0	4	0	17	0	12	0	7	0	2	0	15	0	10	0	5	0	18	14/72
15	0	0	5	0	0	10	0	0	3	0	0	8	0	0	1	0	0	6	0	0	11	0	0	4	0	0	9	0	0	2	0	0	7	0	0	12	15/72
16	0	0	0	7	0	0	0	5	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	8	0	0	0	6	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0	0	9	16/72
17	17	34	15	32	13	30	11	28	9	26	7	24	5	22	3	20	1	18	35	16	33	14	31	12	29	10	27	8	25	6	23	4	21	2	19	36	17/72
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	18/72

Tablica 36/1



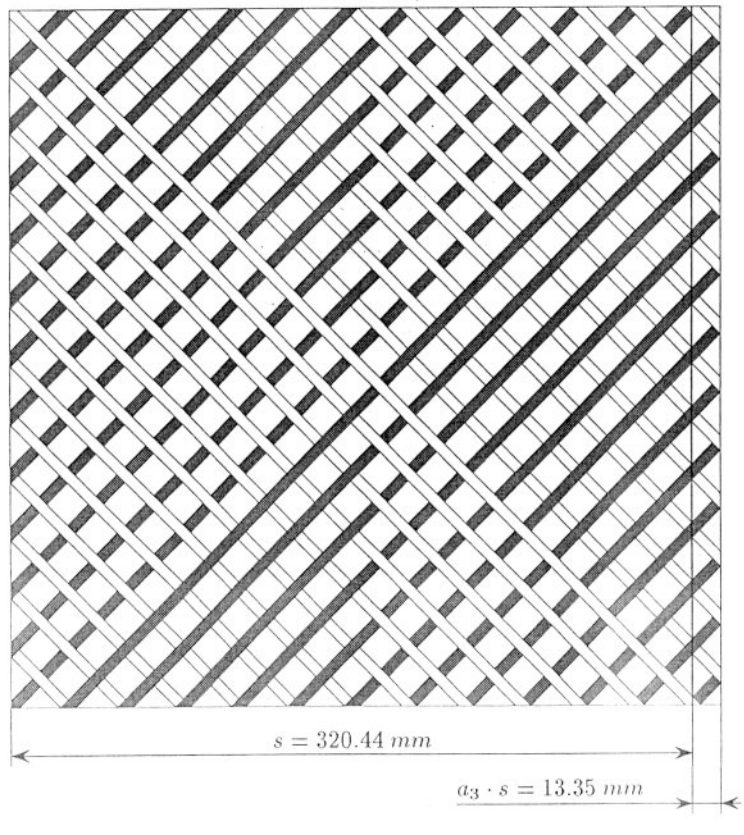
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/2



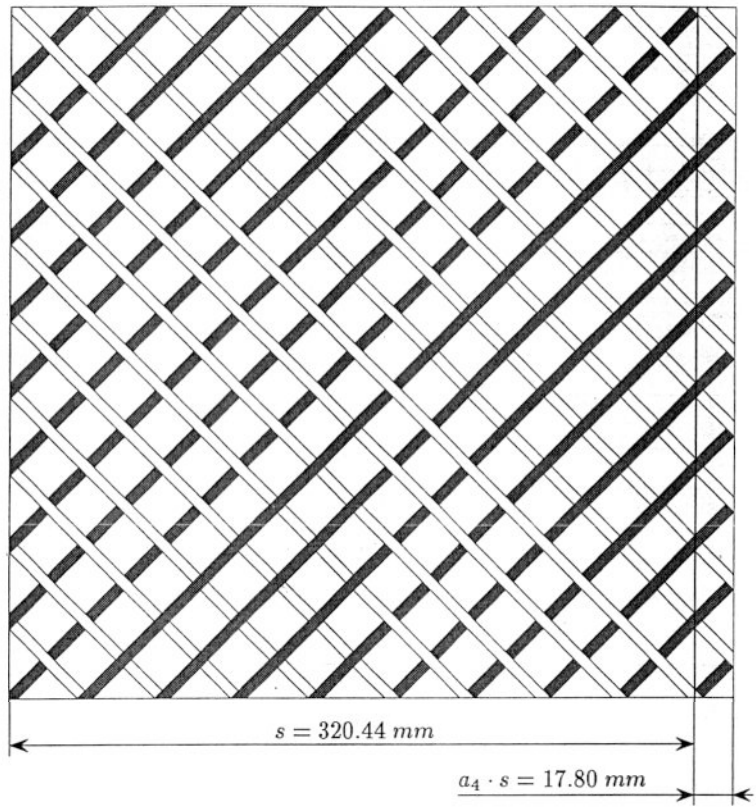
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/3



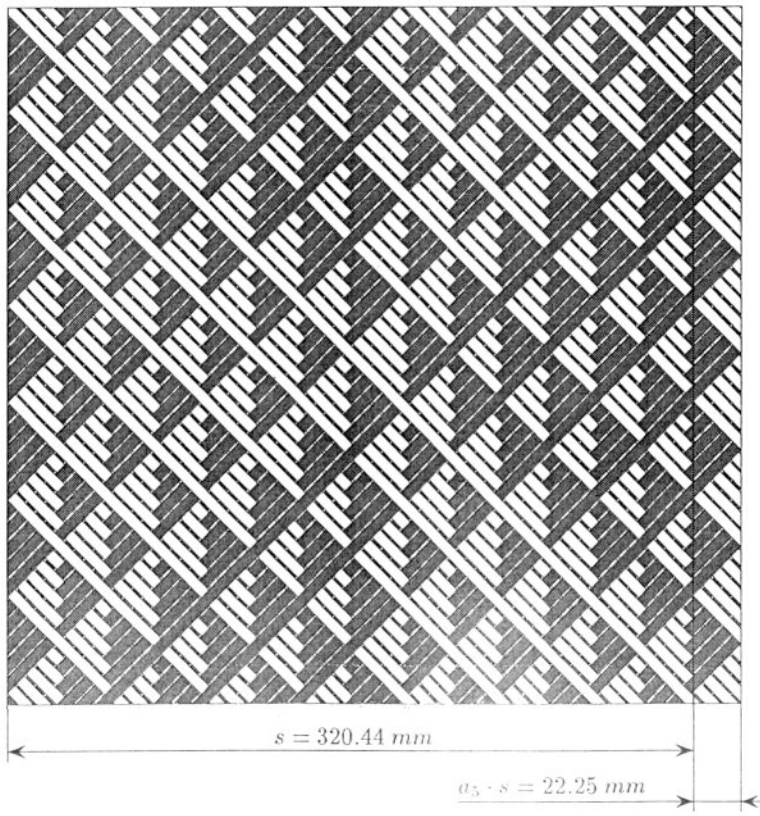
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/4



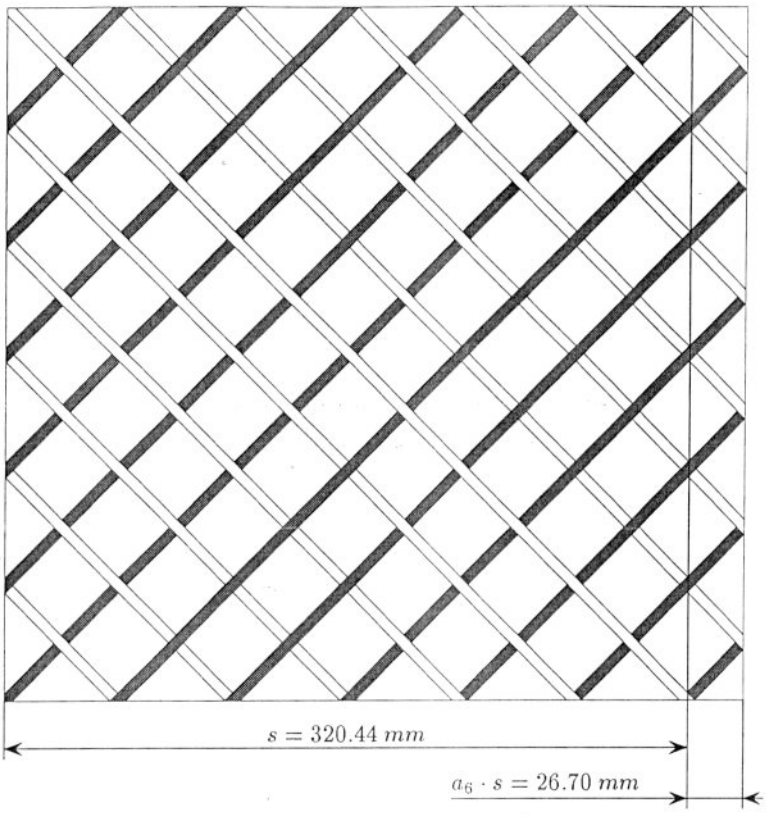
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/5



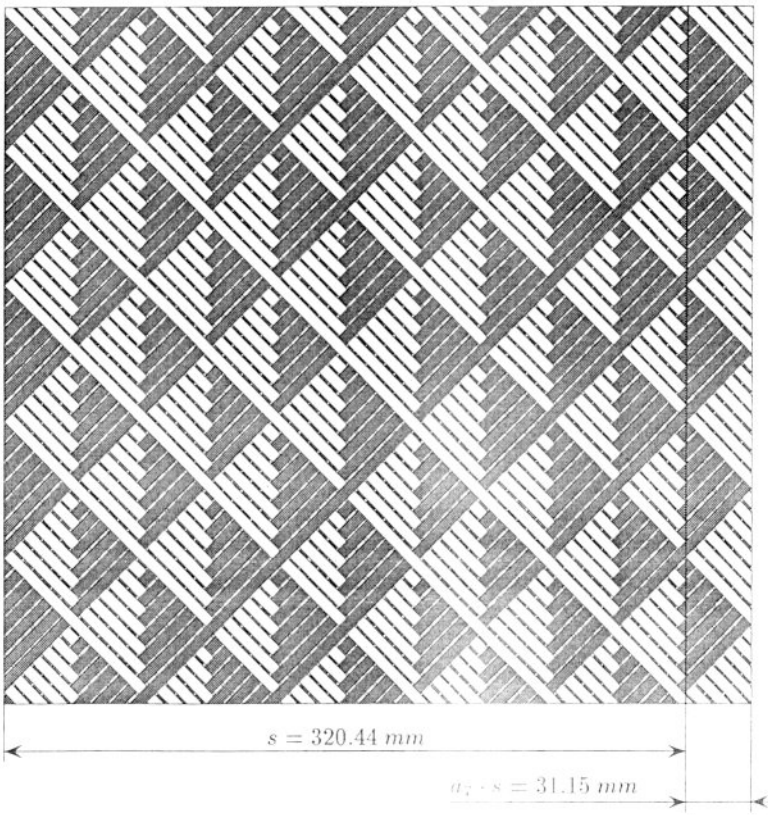
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/6



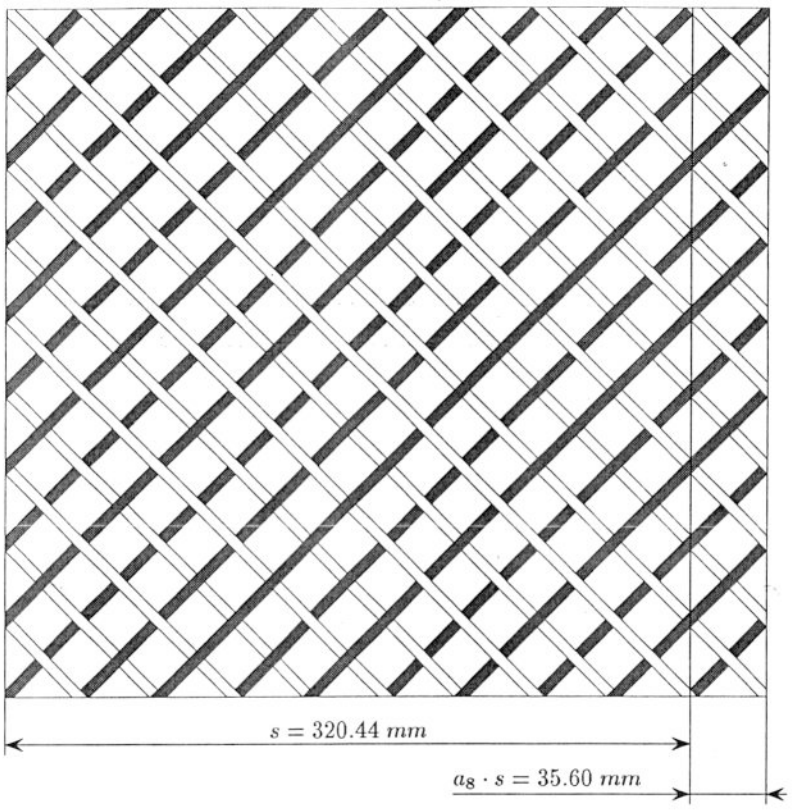
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/7



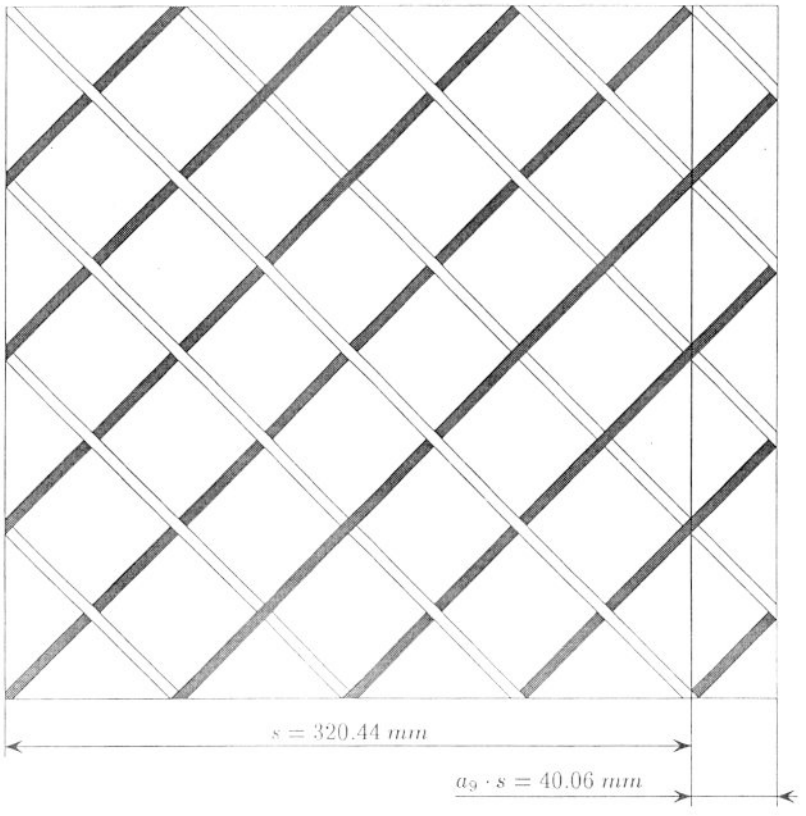
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/8



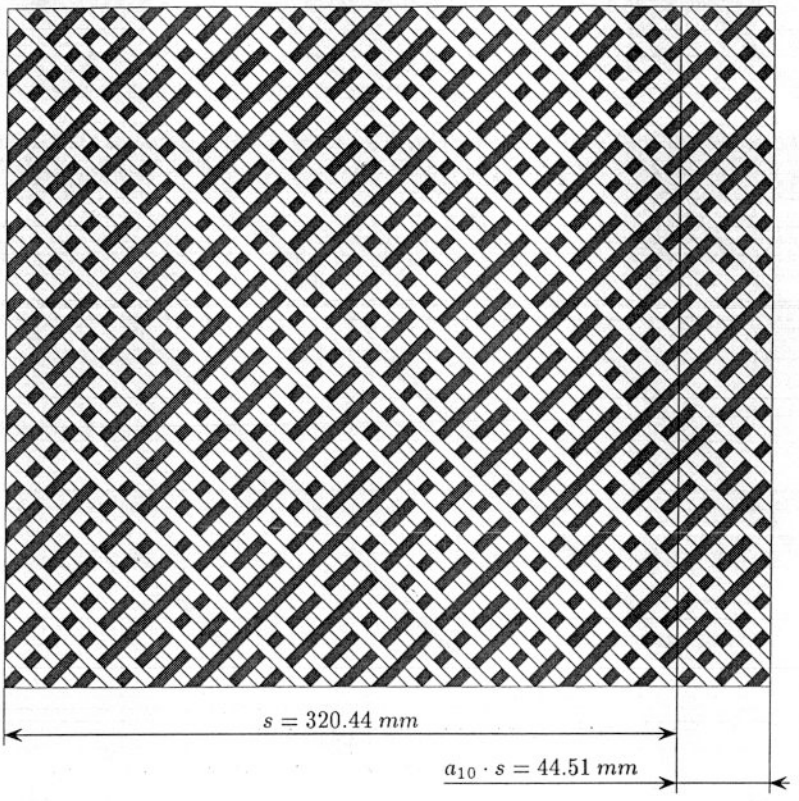
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/9



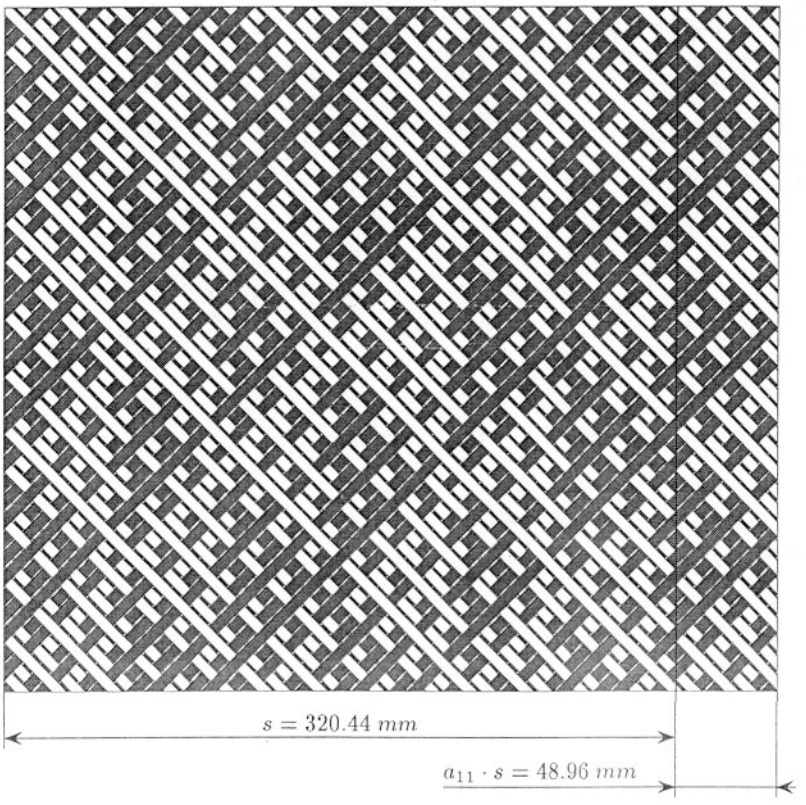
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/10



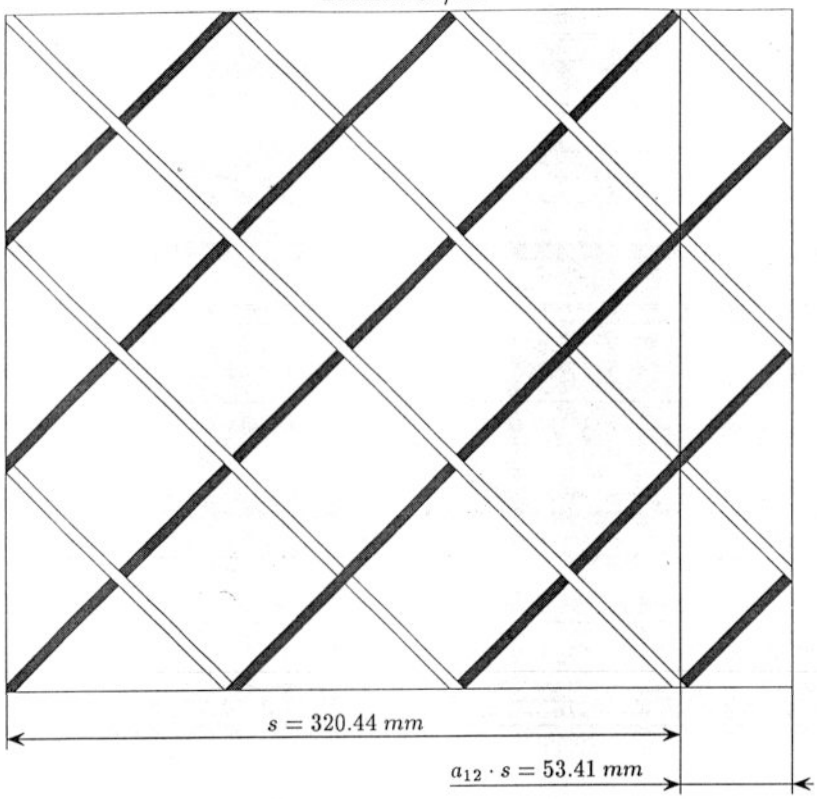
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/11



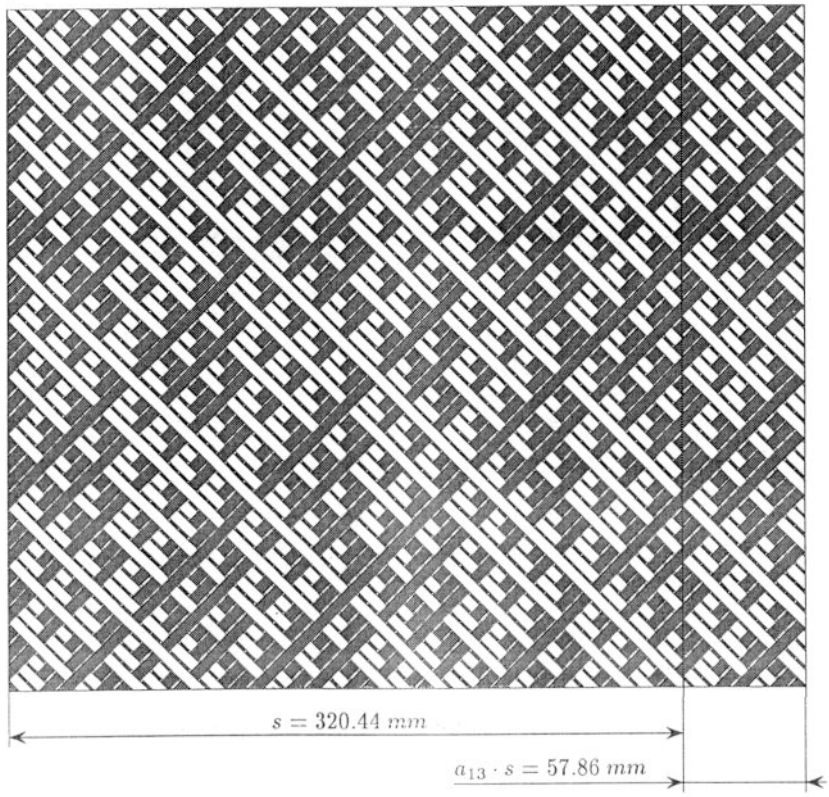
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/12



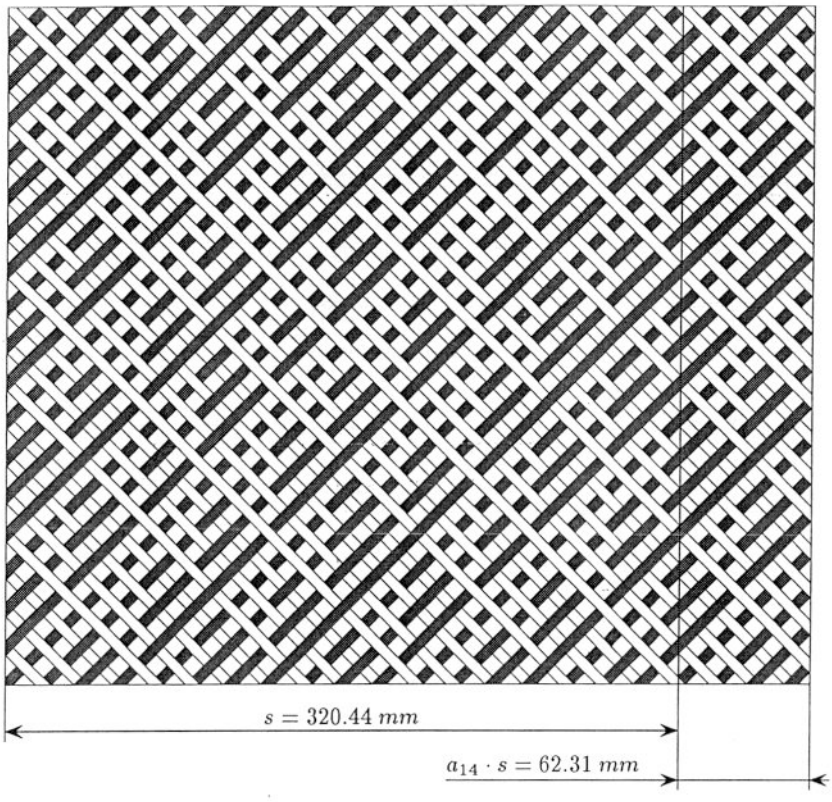
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/13



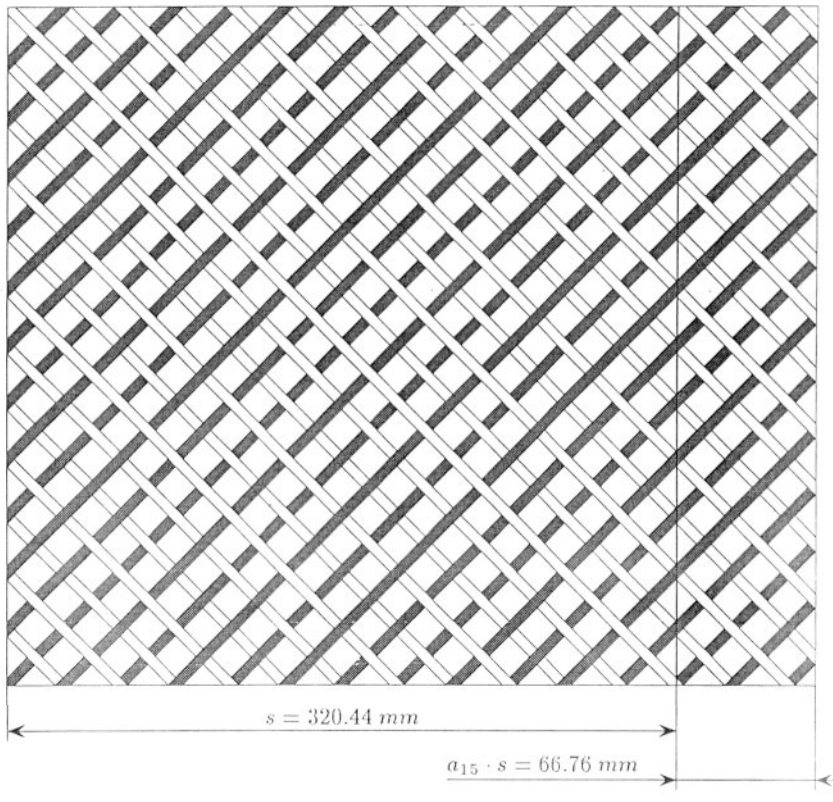
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/14



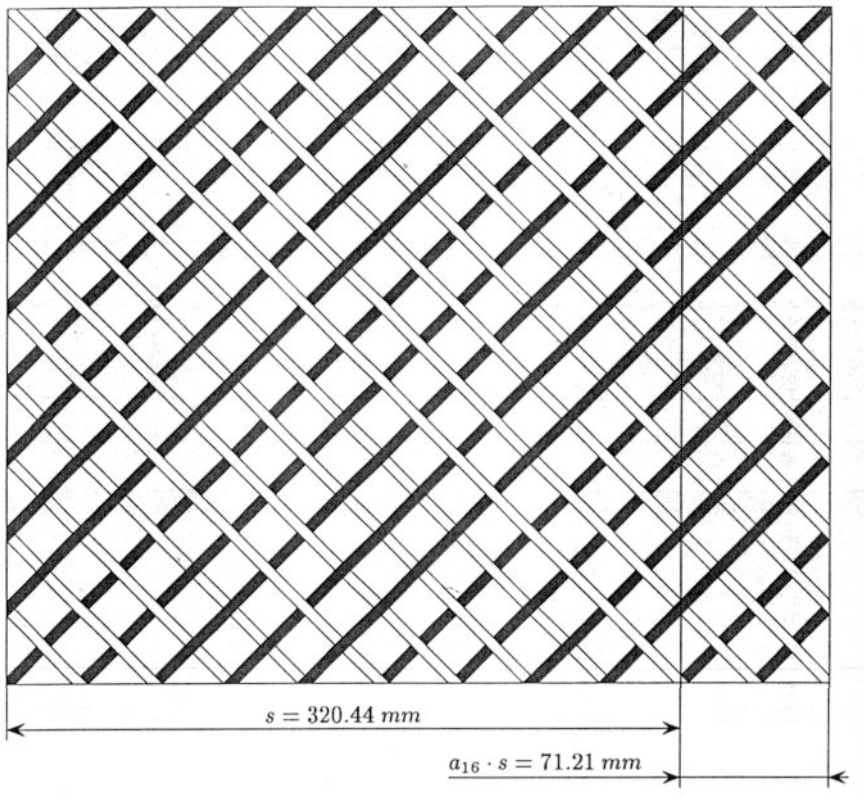
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/15



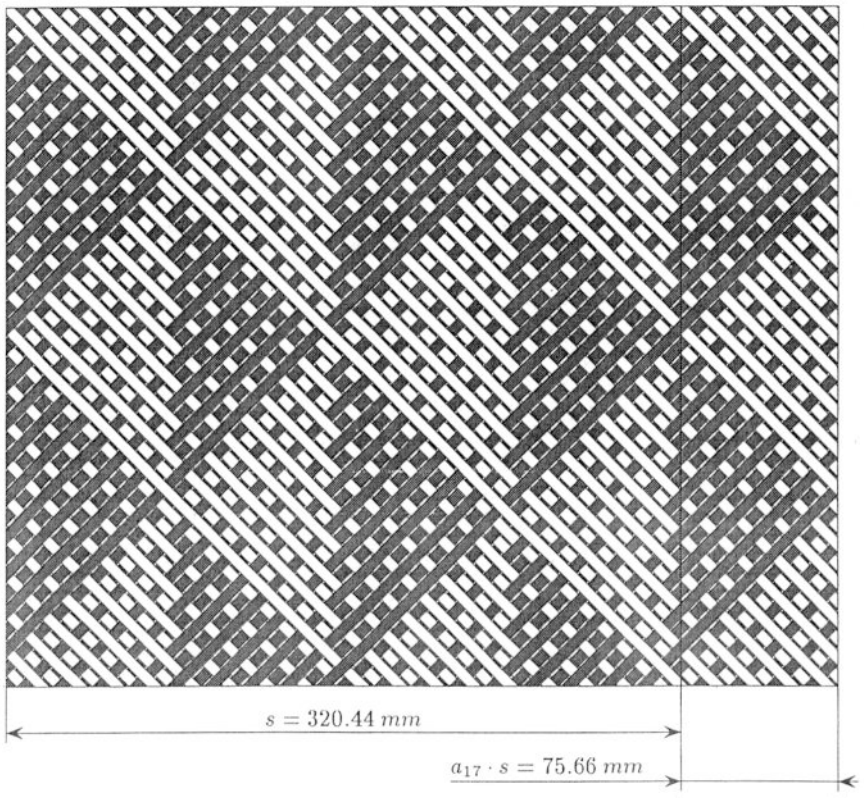
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/16



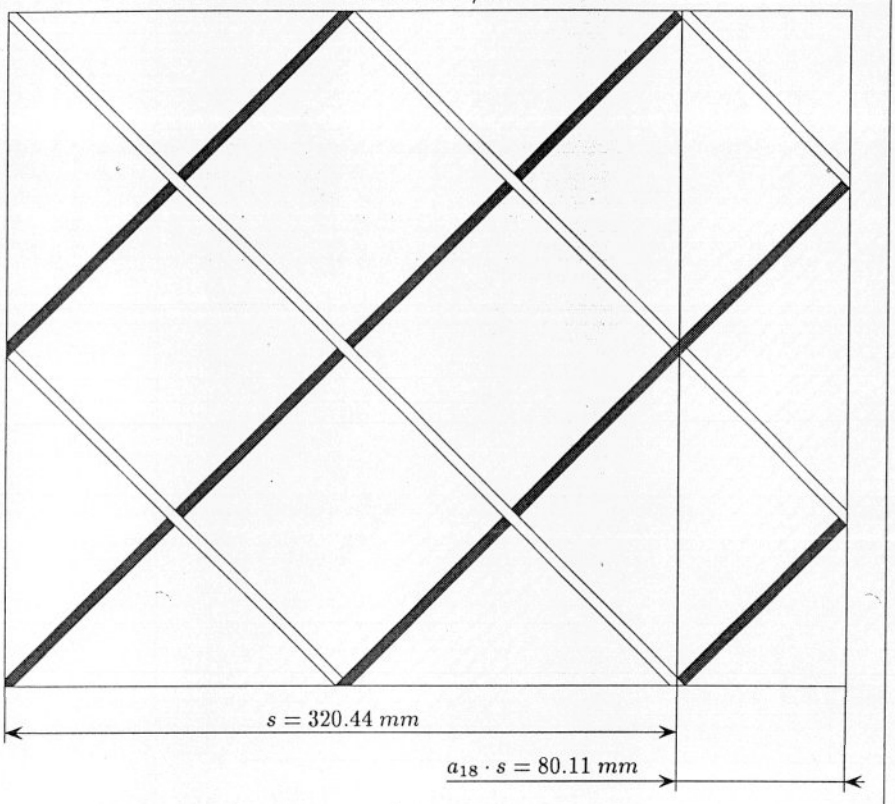
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 36/17



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

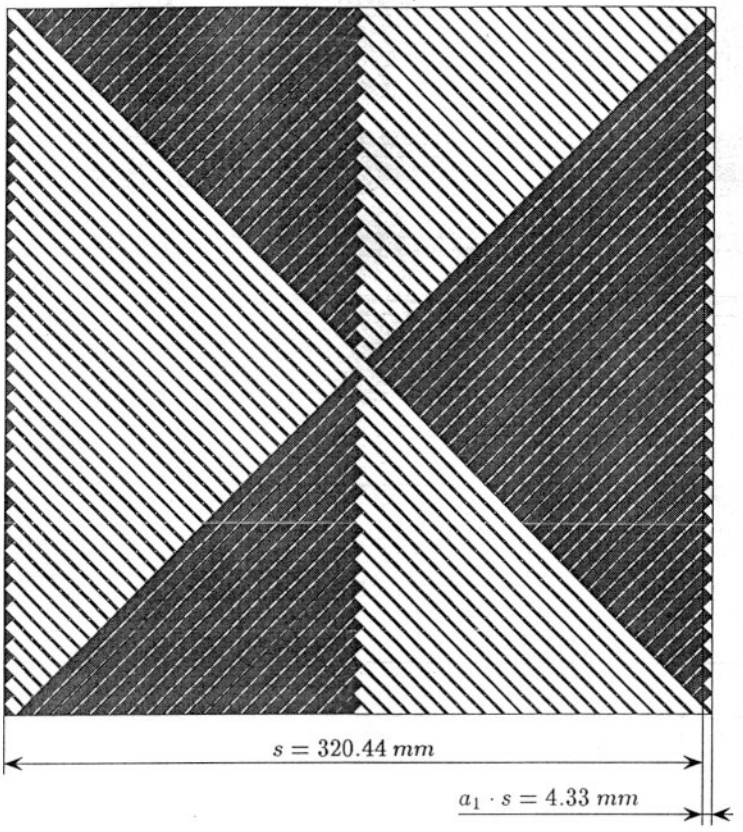
Tablica 36/18



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

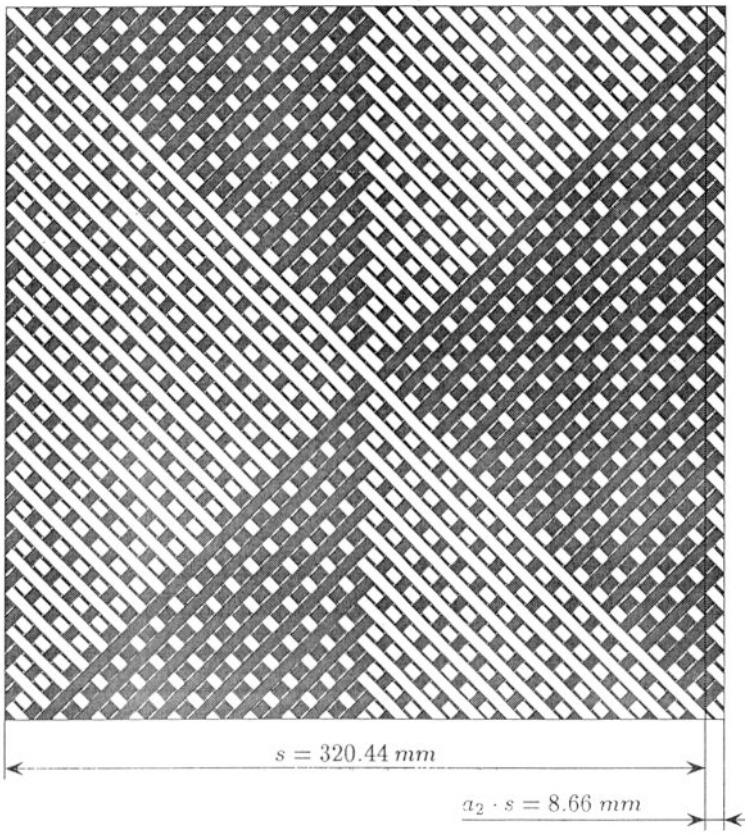
Liczba wiązek rowingu: 37																																			$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																		$= Nr/(2 \cdot 37)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	1/74
2	19	1	20	2	21	3	22	4	23	5	24	6	25	7	26	8	27	9	28	10	29	11	30	12	31	13	32	14	33	15	34	16	35	17	36	18	37	2/74
3	25	13	1	26	14	2	27	15	3	28	16	4	29	17	5	30	18	6	31	19	7	32	20	8	33	21	9	34	22	10	35	23	11	36	24	12	37	3/74
4	28	19	10	1	29	20	11	2	30	21	12	3	31	22	13	4	32	23	14	5	33	24	15	6	34	25	16	7	35	26	17	8	36	27	18	9	37	4/74
5	15	30	8	23	1	16	31	9	24	2	17	32	10	25	3	18	33	11	26	4	19	34	12	27	5	20	35	13	28	6	21	36	14	29	7	22	37	5/74
6	31	25	19	13	7	1	32	26	20	14	8	2	33	27	21	15	9	3	34	28	22	16	10	4	35	29	23	17	11	5	36	30	24	18	12	6	37	6/74
7	16	32	11	27	6	22	1	17	33	12	28	7	23	2	18	34	13	29	8	24	3	19	35	14	30	9	25	4	20	36	15	31	10	26	5	21	37	7/74
8	14	28	5	19	33	10	24	1	15	29	6	20	34	11	25	2	16	30	7	21	35	12	26	3	17	31	8	22	36	13	27	4	18	32	9	23	37	8/74
9	33	29	25	21	17	13	9	5	1	34	30	26	22	18	14	10	6	2	35	31	27	23	19	15	11	7	3	36	32	28	24	20	16	12	8	4	37	9/74
10	26	15	4	30	19	8	34	23	12	1	27	16	5	31	20	9	35	24	13	2	28	17	6	32	21	10	36	25	14	3	29	18	7	33	22	11	37	10/74
11	27	17	7	34	24	14	4	31	21	11	1	28	18	8	35	25	15	5	32	22	12	2	29	19	9	36	26	16	6	33	23	13	3	30	20	10	37	11/74
12	34	31	28	25	22	19	16	13	10	7	4	1	35	32	29	26	23	20	17	14	11	8	5	2	36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	37	12/74
13	20	3	23	6	26	9	29	12	32	15	35	18	1	21	4	24	7	27	10	30	13	33	16	36	19	2	22	5	25	8	28	11	31	14	34	17	37	13/74
14	8	16	24	32	3	11	19	27	35	6	14	22	30	1	9	17	25	33	4	12	20	28	36	7	15	23	31	2	10	18	26	34	5	13	21	29	37	14/74
15	5	10	15	20	25	30	35	3	8	13	18	23	28	33	1	6	11	16	21	26	31	36	4	9	14	19	24	29	34	2	7	12	17	22	27	32	37	15/74
16	7	14	21	28	35	5	12	19	26	33	3	10	17	24	31	1	8	15	22	29	36	6	13	20	27	34	4	11	18	25	32	2	9	16	23	30	37	16/74
17	24	11	35	22	9	33	20	7	31	18	5	29	16	3	27	14	1	25	12	36	23	10	34	21	8	32	19	6	30	17	4	28	15	2	26	13	37	17/74
18	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	37	18/74

Tablica 37/1



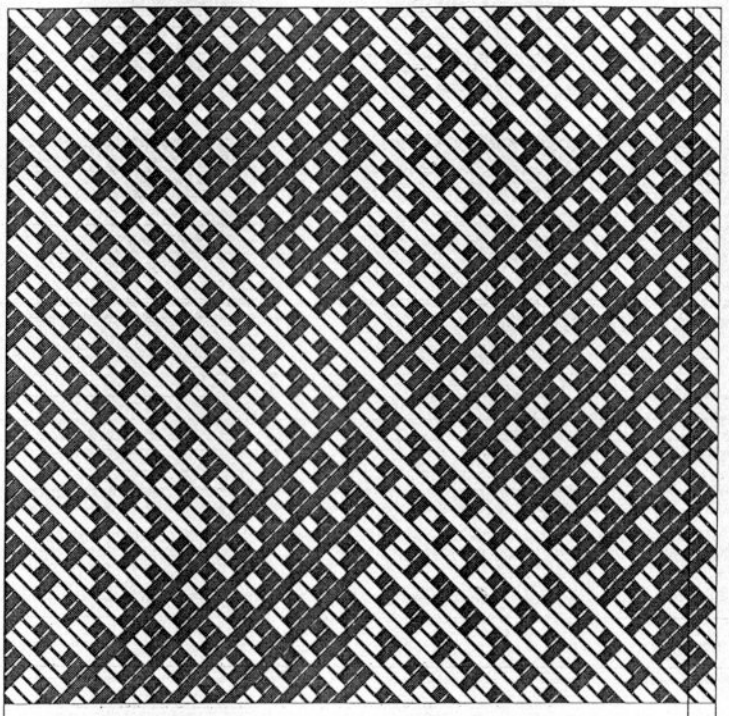
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/2



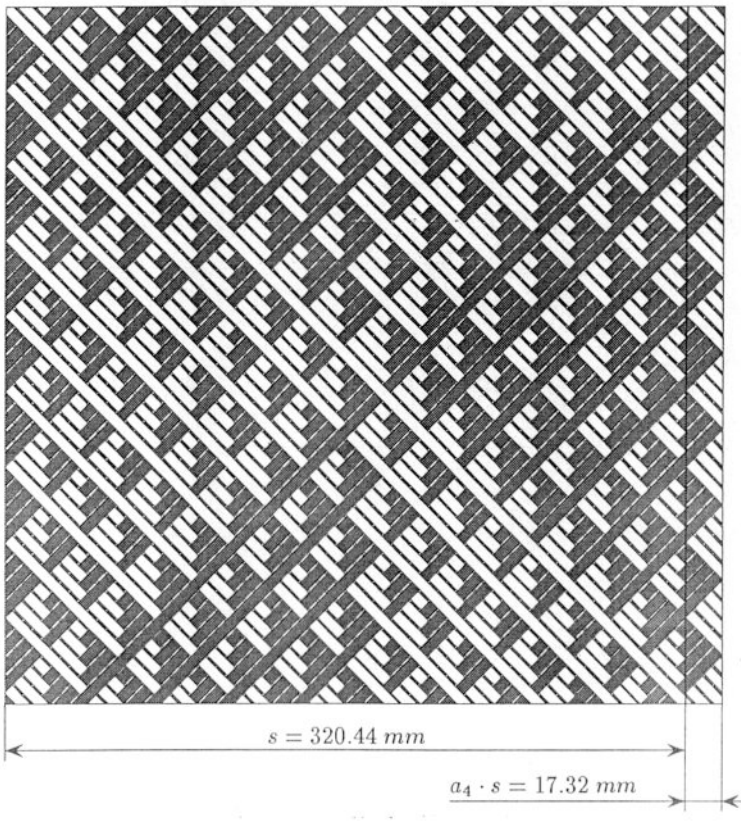
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/3



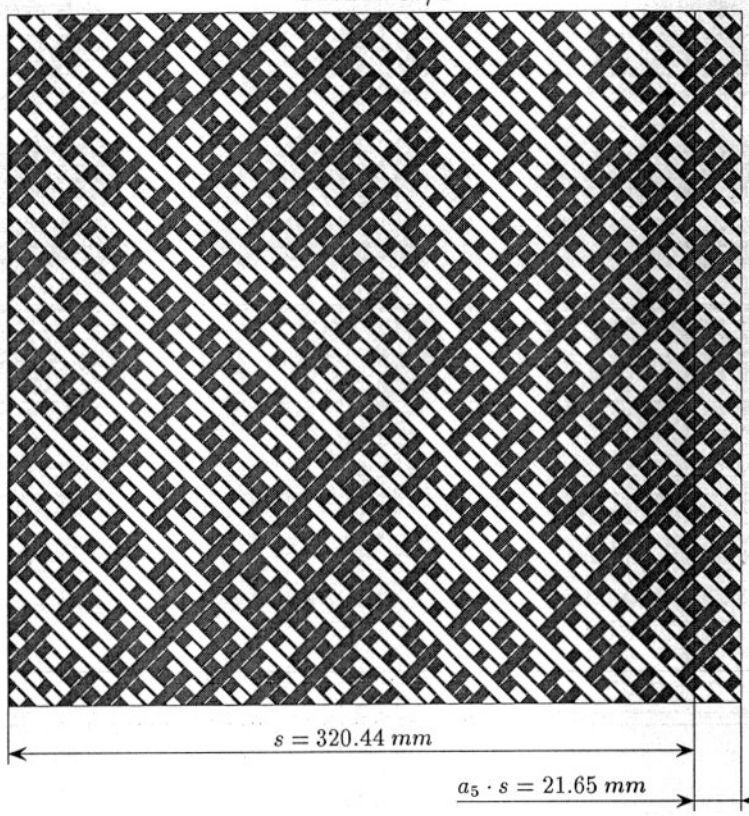
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/4



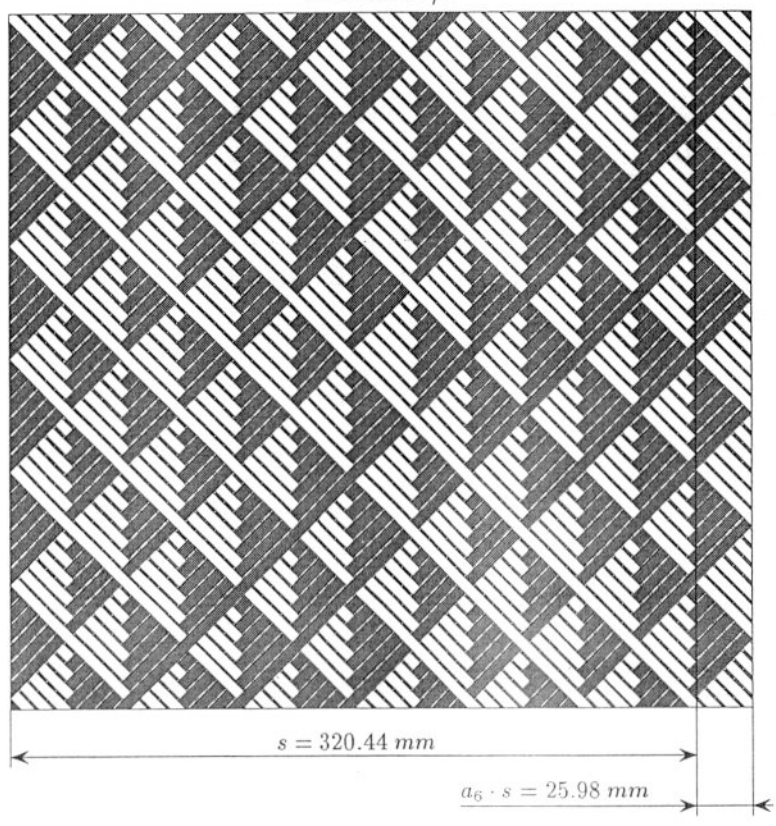
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/5



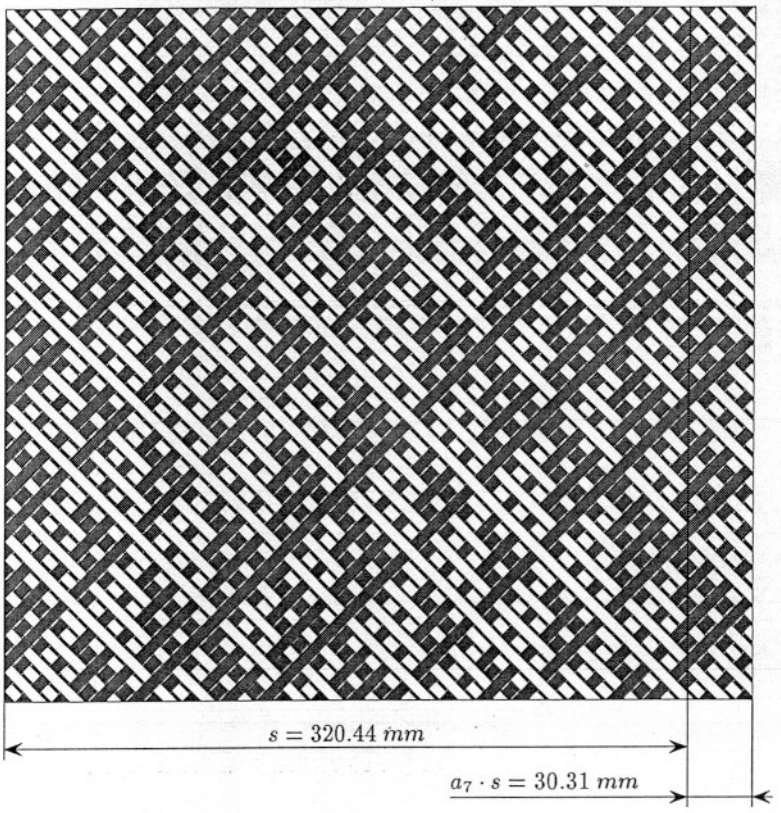
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{\circ}$

Tablica 37/6



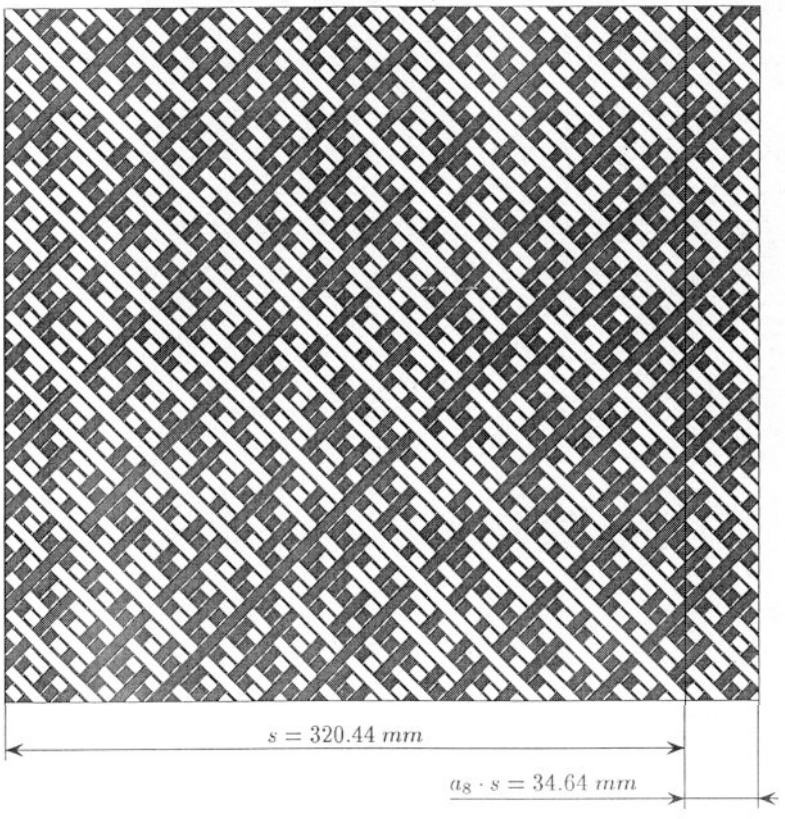
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{\circ}$

Tablica 37/7



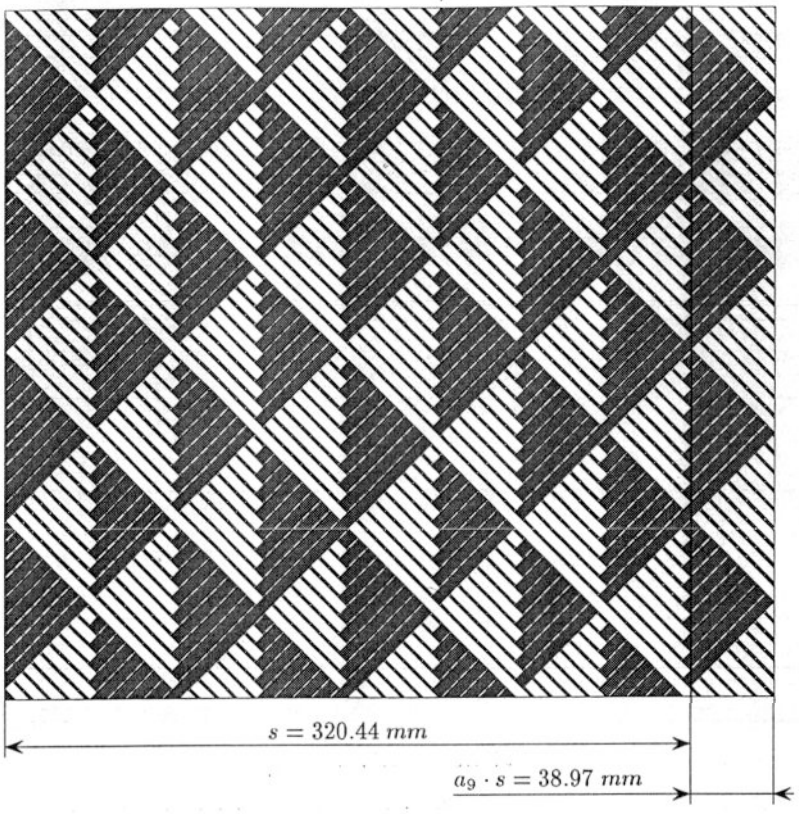
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/8



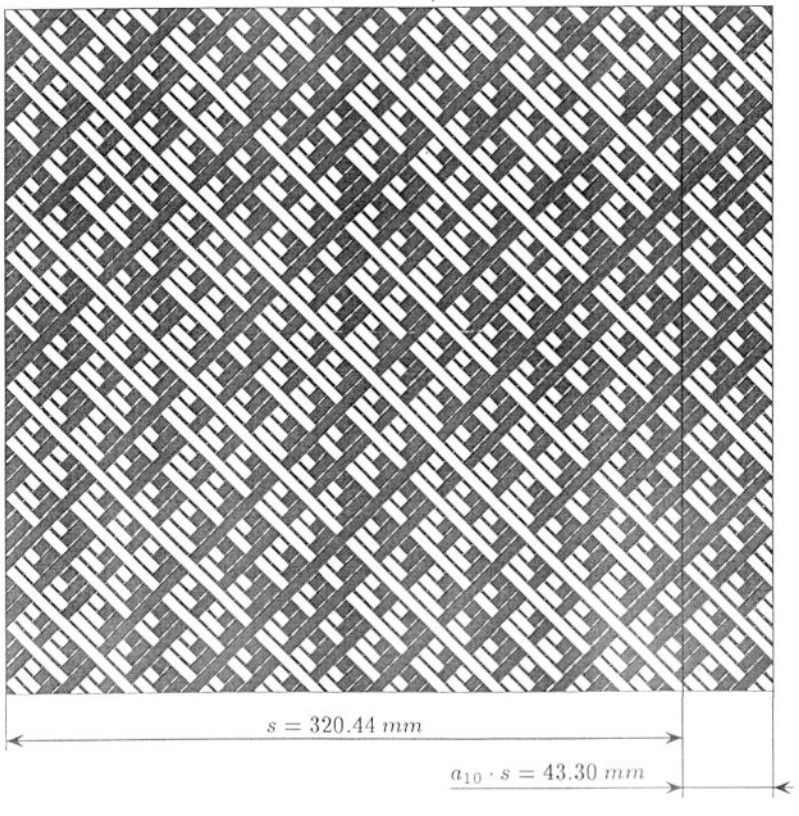
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/9



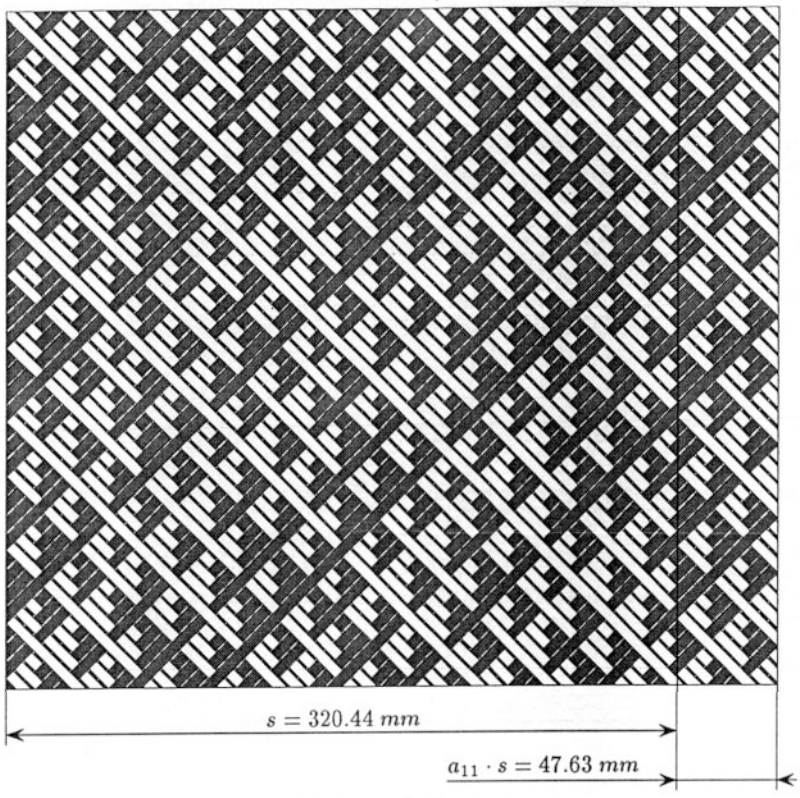
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/10



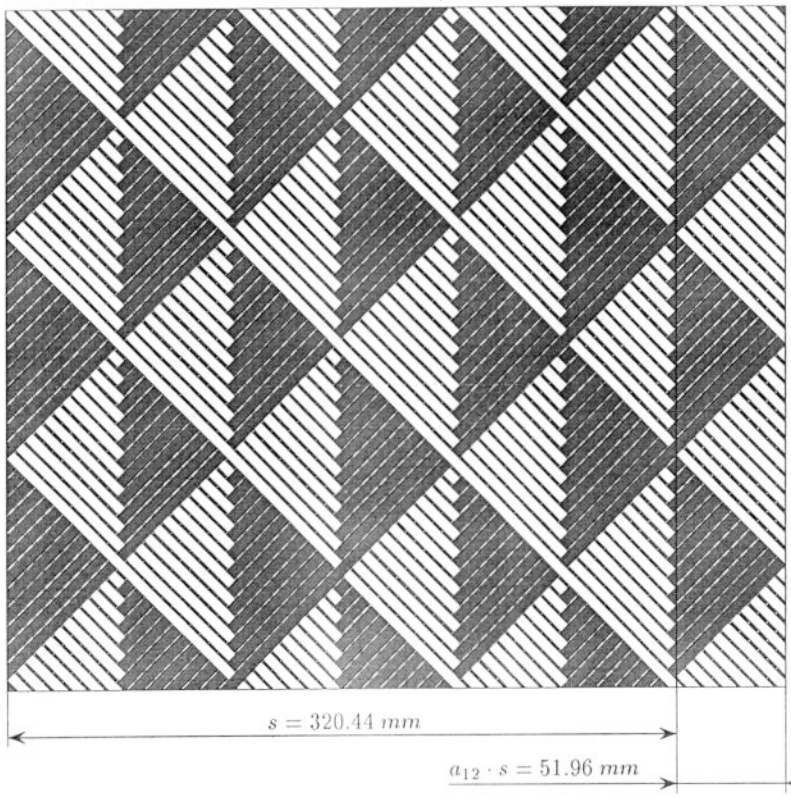
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/11



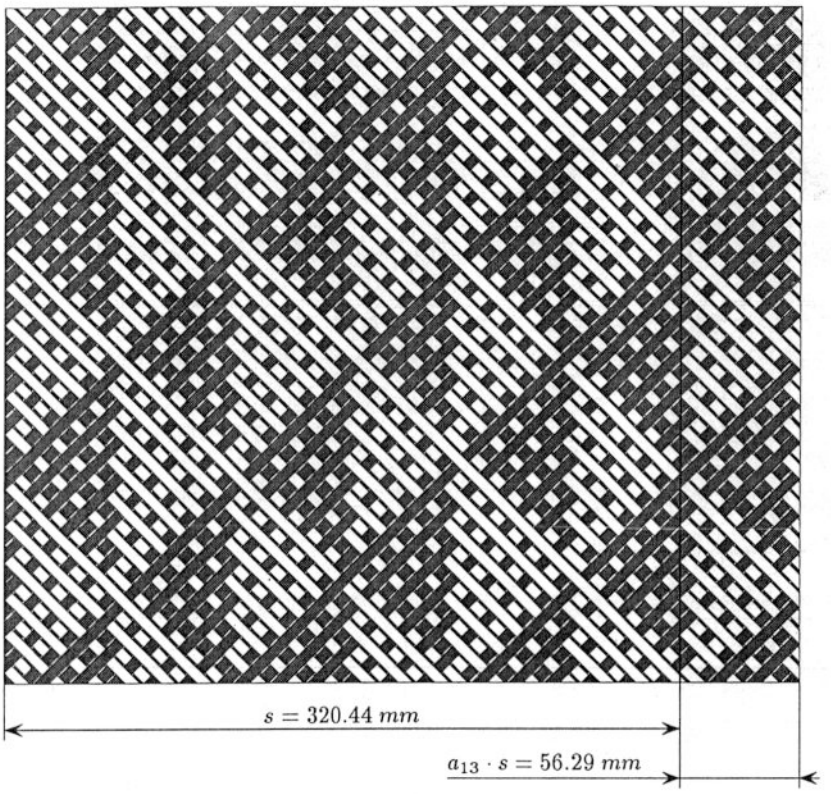
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/12



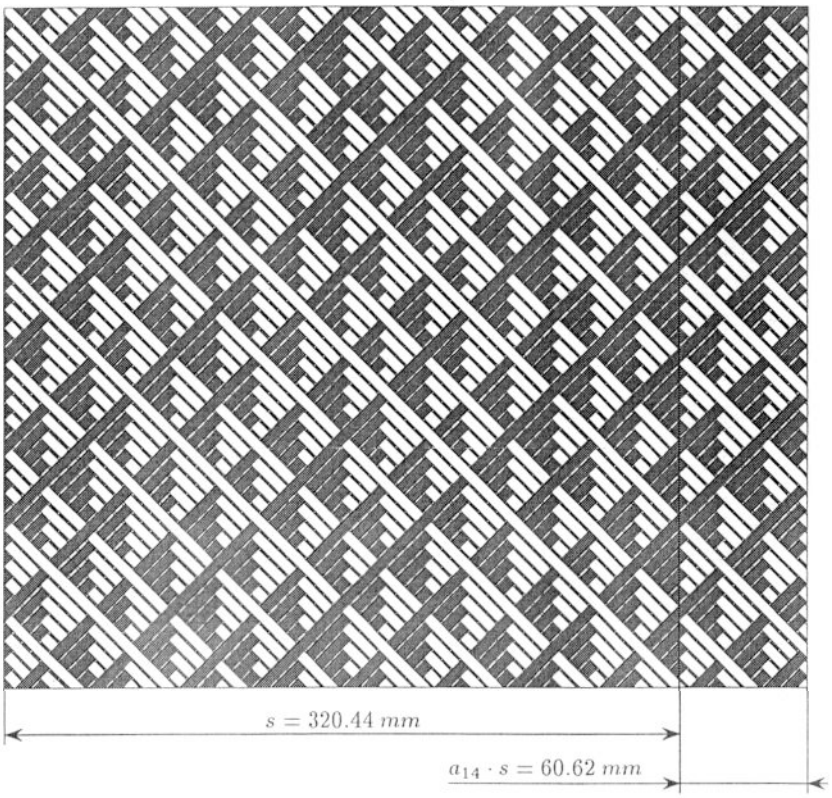
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/13



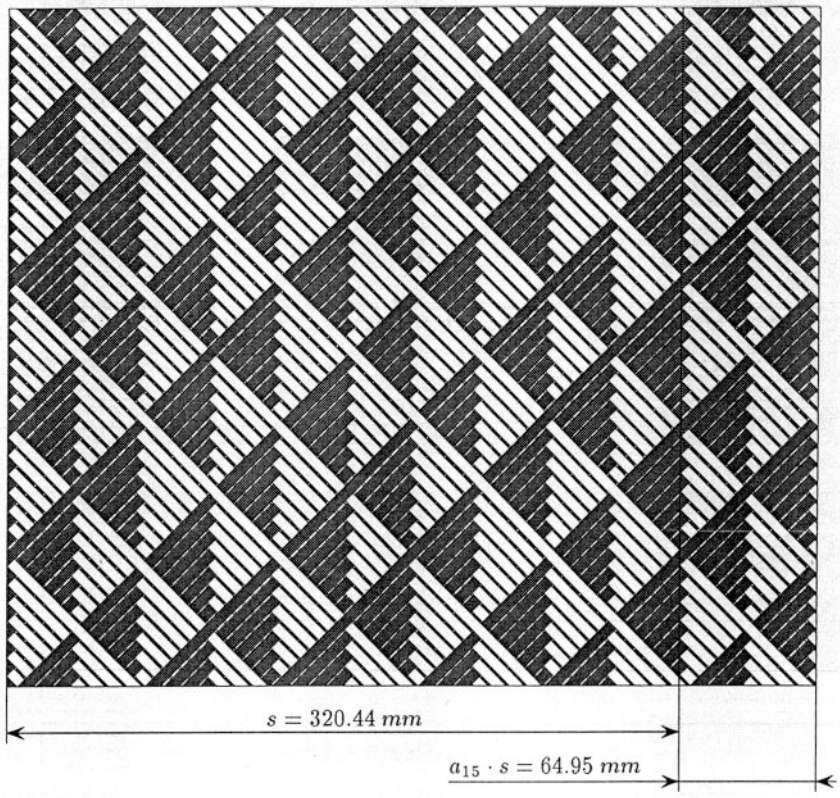
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/14



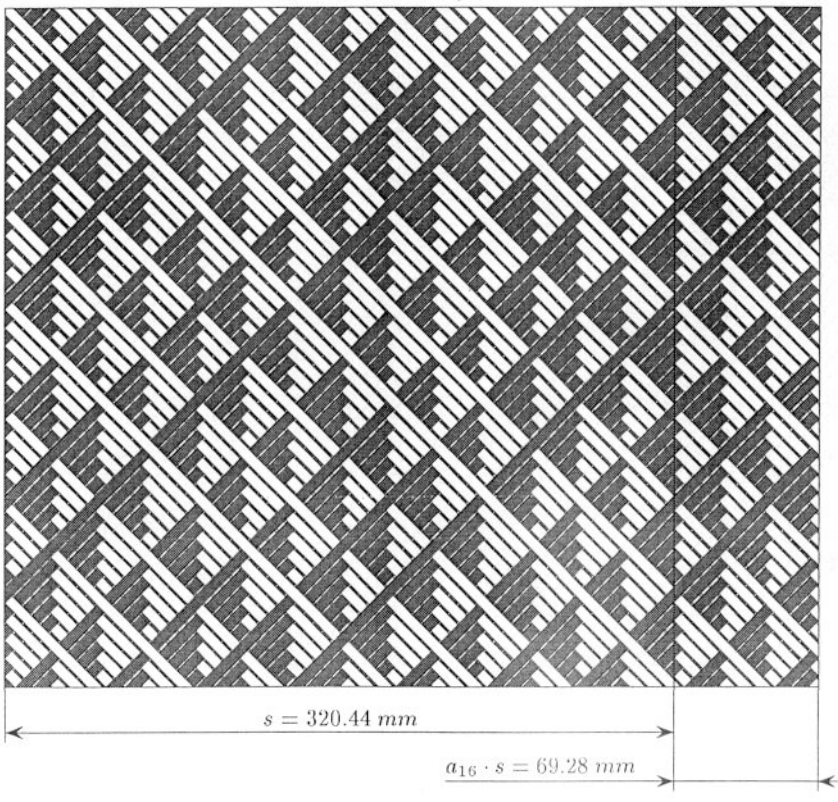
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/15



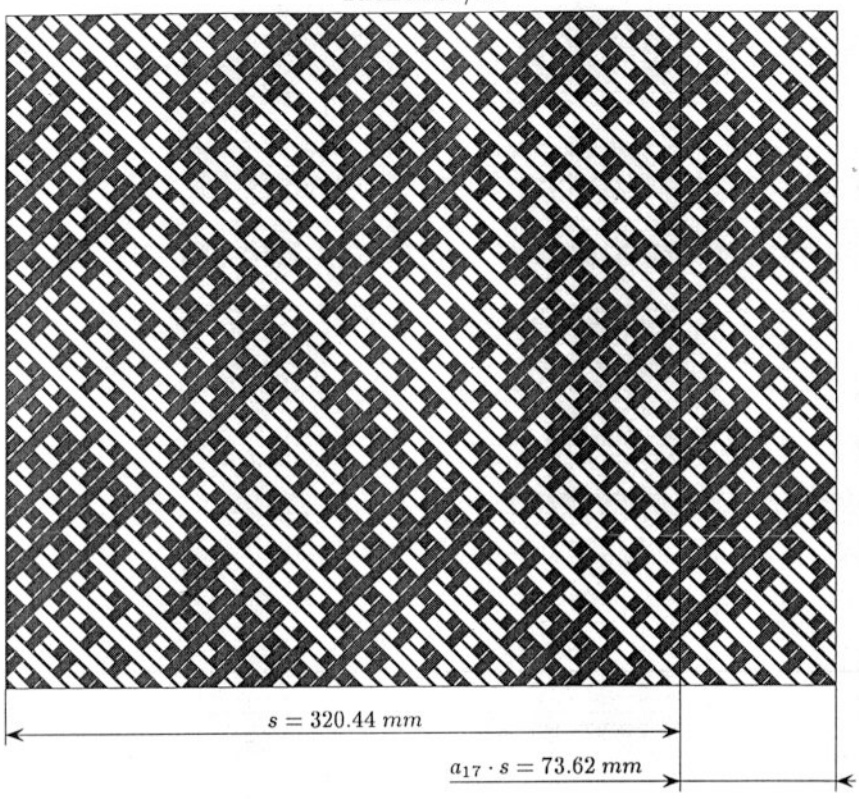
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/16



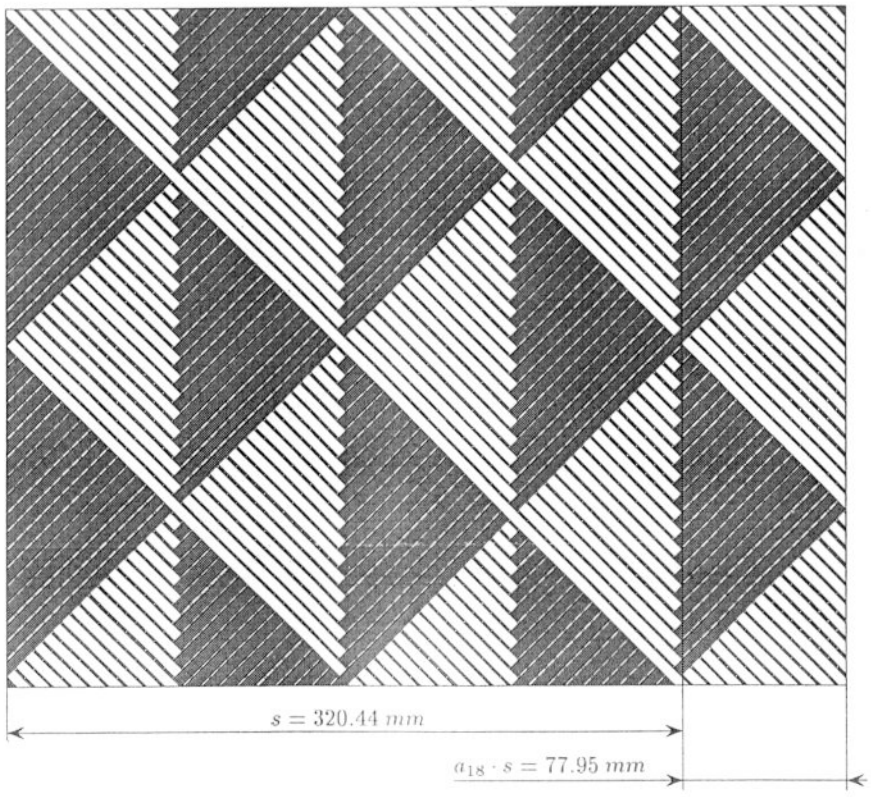
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 37/17



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

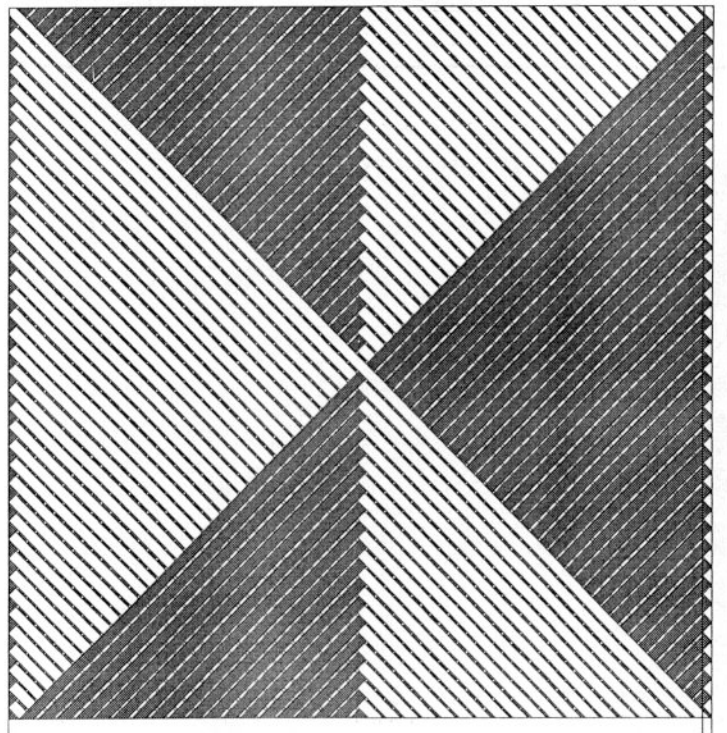
Tablica 37/18



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

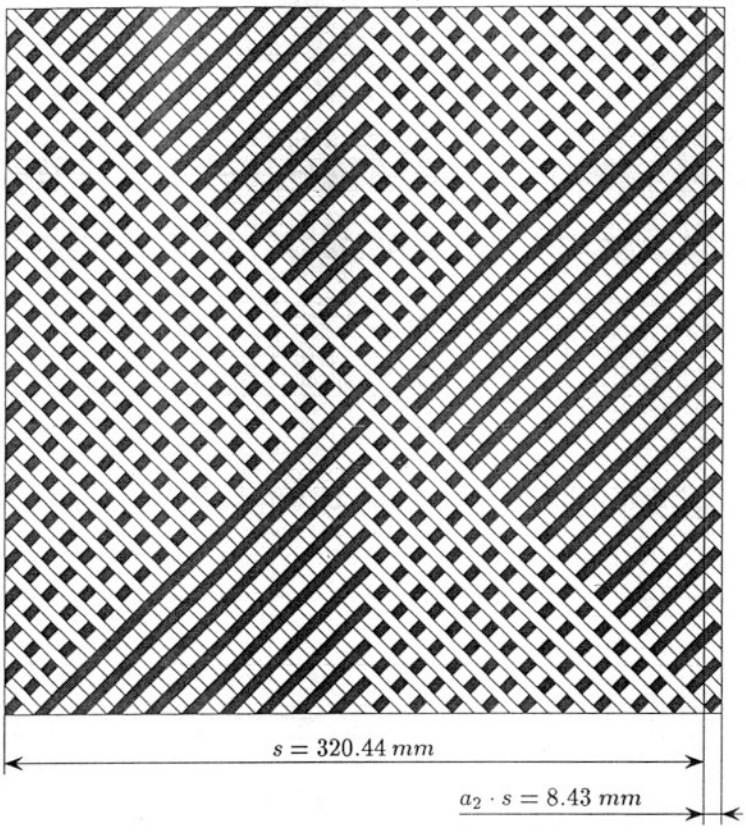
Liczba wiązek rowingu: 38																																				$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																			$= Nr/(2 \cdot 38)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	1/76
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	0	16	0	17	0	18	0	19	2/76
3	13	26	1	14	27	2	15	28	3	16	29	4	17	30	5	18	31	6	19	32	7	20	33	8	21	34	9	22	35	10	23	36	11	24	37	12	25	38	3/76
4	0	10	0	1	0	11	0	2	0	12	0	3	0	13	0	4	0	14	0	5	0	15	0	6	0	16	0	7	0	17	0	8	0	18	0	9	0	19	4/76
5	23	8	31	16	1	24	9	32	17	2	25	10	33	18	3	26	11	34	19	4	27	12	35	20	5	28	13	36	21	6	29	14	37	22	7	30	15	38	5/76
6	0	13	0	7	0	1	0	14	0	8	0	2	0	15	0	9	0	3	0	16	0	10	0	4	0	17	0	11	0	5	0	18	0	12	0	6	0	19	6/76
7	11	22	33	6	17	28	1	12	23	34	7	18	29	2	13	24	35	8	19	30	3	14	25	36	9	20	31	4	15	26	37	10	21	32	5	16	27	38	7/76
8	0	5	0	10	0	15	0	1	0	6	0	11	0	16	0	2	0	7	0	12	0	17	0	3	0	8	0	13	0	18	0	4	0	9	0	14	0	19	8/76
9	17	34	13	30	9	26	5	22	1	18	35	14	31	10	27	6	23	2	19	36	15	32	11	28	7	24	3	20	37	16	33	12	29	8	25	4	21	38	9/76
10	0	4	0	8	0	12	0	16	0	1	0	5	0	9	0	13	0	17	0	2	0	6	0	10	0	14	0	18	0	3	0	7	0	11	0	15	0	19	10/76
11	7	14	21	28	35	4	11	18	25	32	1	8	15	22	29	36	5	12	19	26	33	2	9	16	23	30	37	6	13	20	27	34	3	10	17	24	31	38	11/76
12	0	16	0	13	0	10	0	7	0	4	0	1	0	17	0	14	0	11	0	8	0	5	0	2	0	18	0	15	0	12	0	9	0	6	0	3	0	19	12/76
13	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	13/76
14	0	11	0	3	0	14	0	6	0	17	0	9	0	1	0	12	0	4	0	15	0	7	0	18	0	10	0	2	0	13	0	5	0	16	0	8	0	19	14/76
15	33	28	23	18	13	8	3	36	31	26	21	16	11	6	1	34	29	24	19	14	9	4	37	32	27	22	17	12	7	2	35	30	25	20	15	10	5	38	15/76
16	0	12	0	5	0	17	0	10	0	3	0	15	0	8	0	1	0	13	0	6	0	18	0	11	0	4	0	16	0	9	0	2	0	14	0	7	0	19	16/76
17	9	18	27	36	7	16	25	34	5	14	23	32	3	12	21	30	1	10	19	28	37	8	17	26	35	6	15	24	33	4	13	22	31	2	11	20	29	38	17/76
18	0	17	0	15	0	13	0	11	0	9	0	7	0	5	0	3	0	1	0	18	0	16	0	14	0	12	0	10	0	8	0	6	0	4	0	2	0	19	18/76
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	19/76

Tablica 38/1



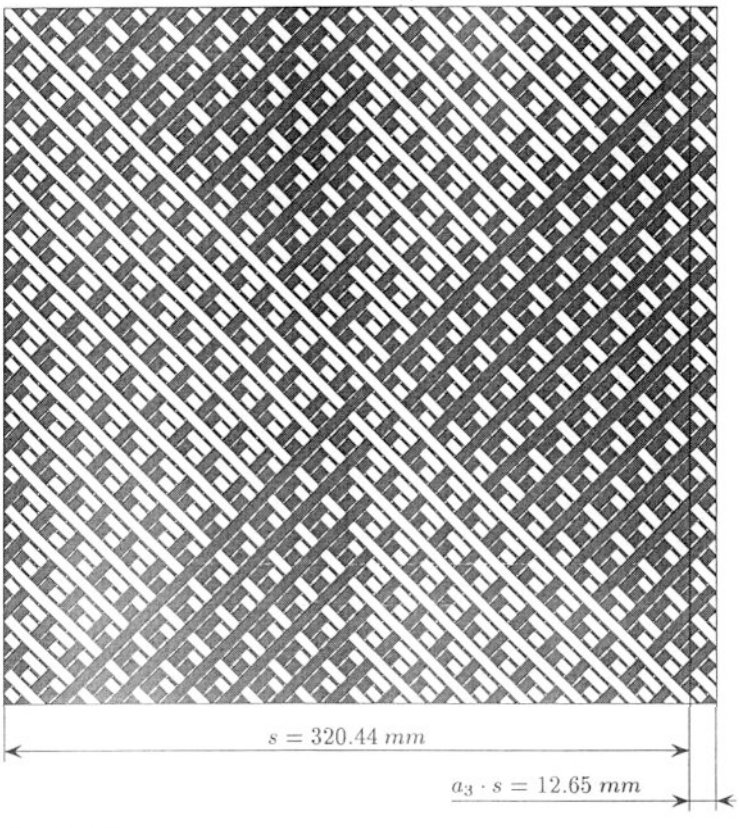
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/2



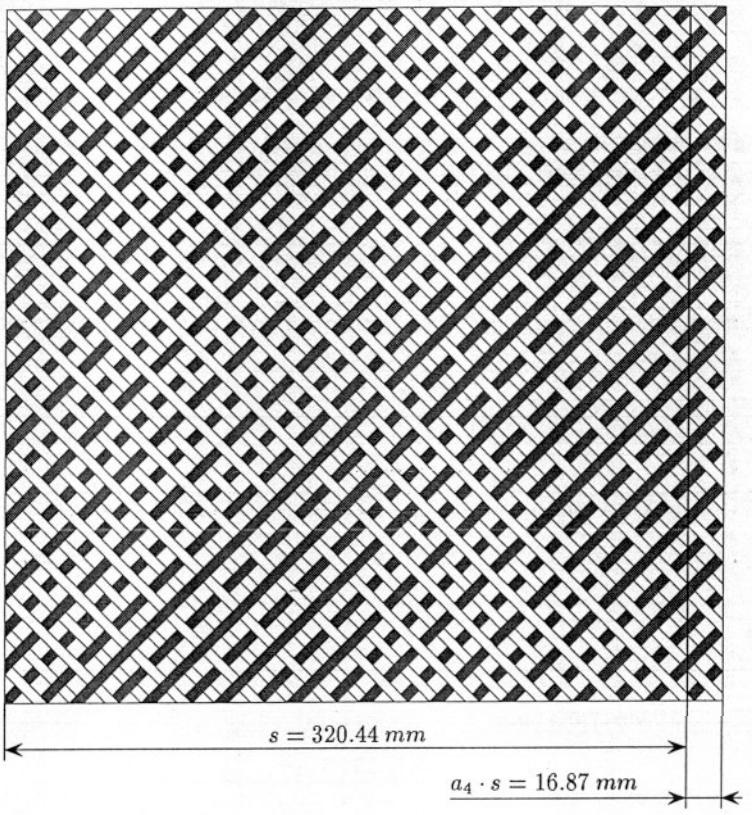
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/3



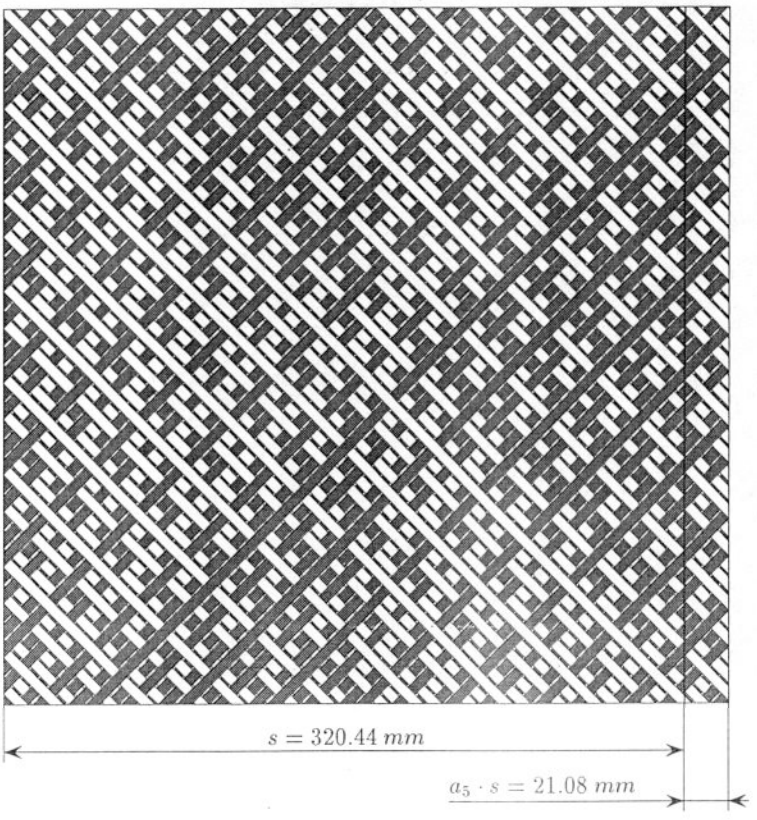
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/4



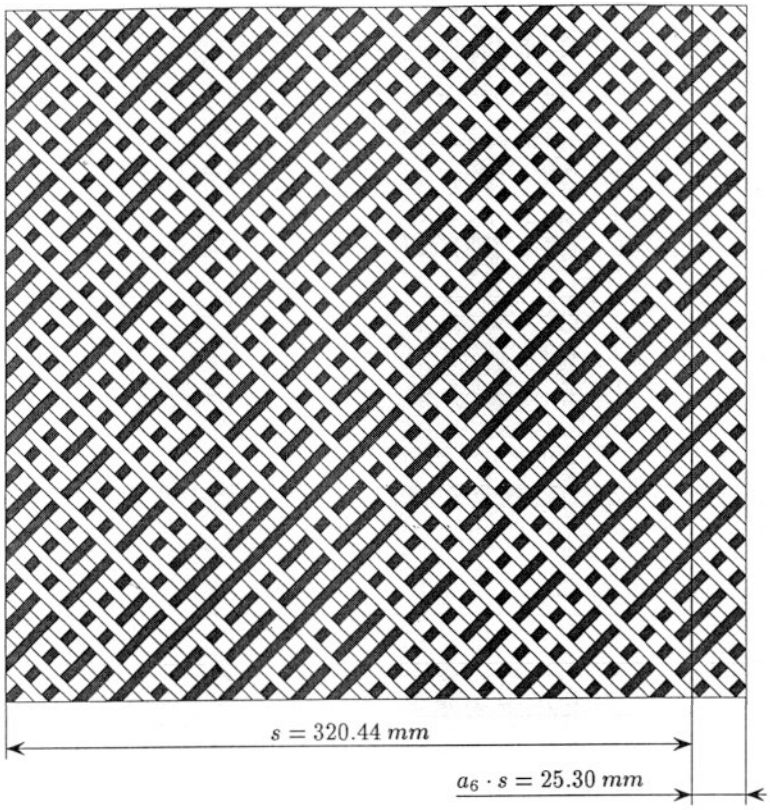
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/5



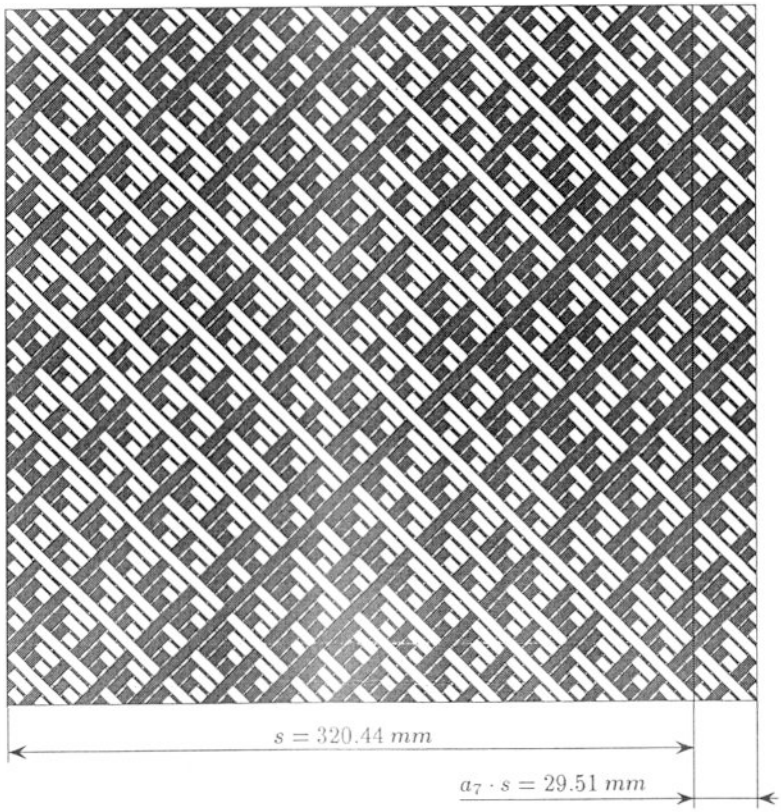
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/6



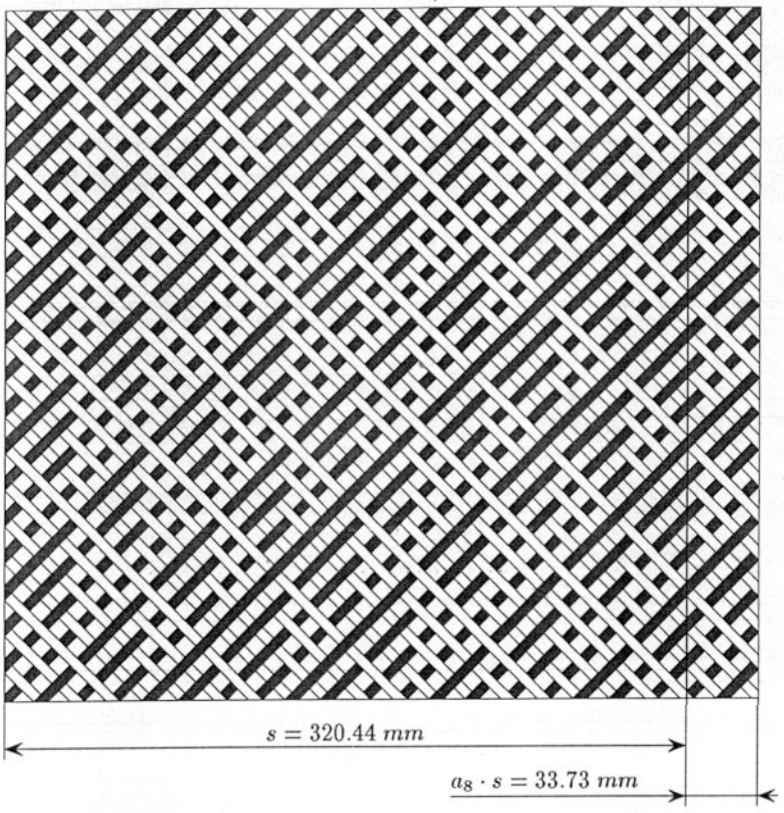
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/7



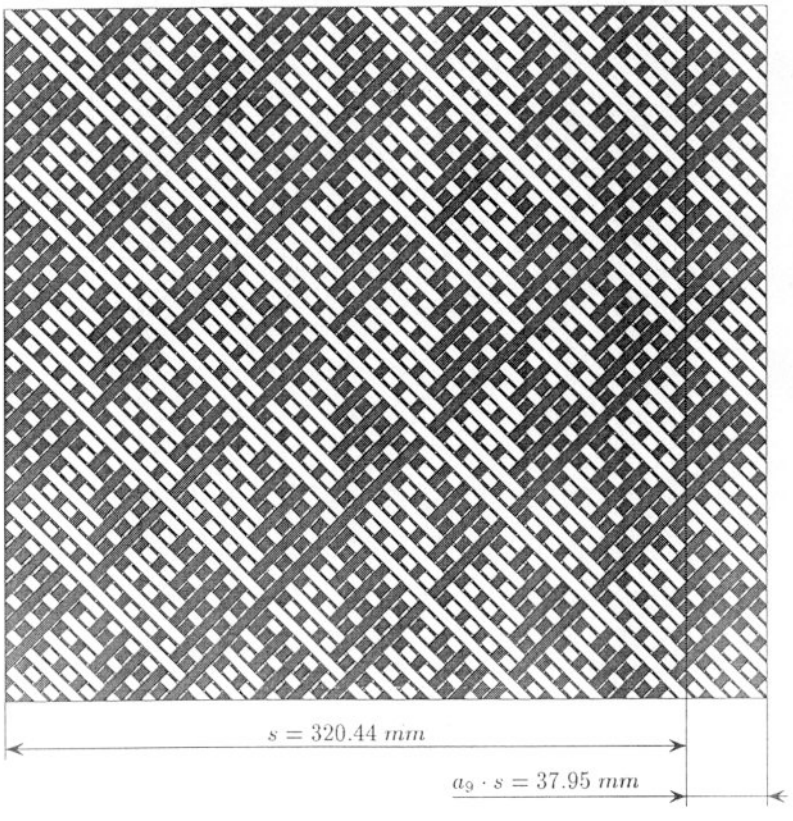
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/8



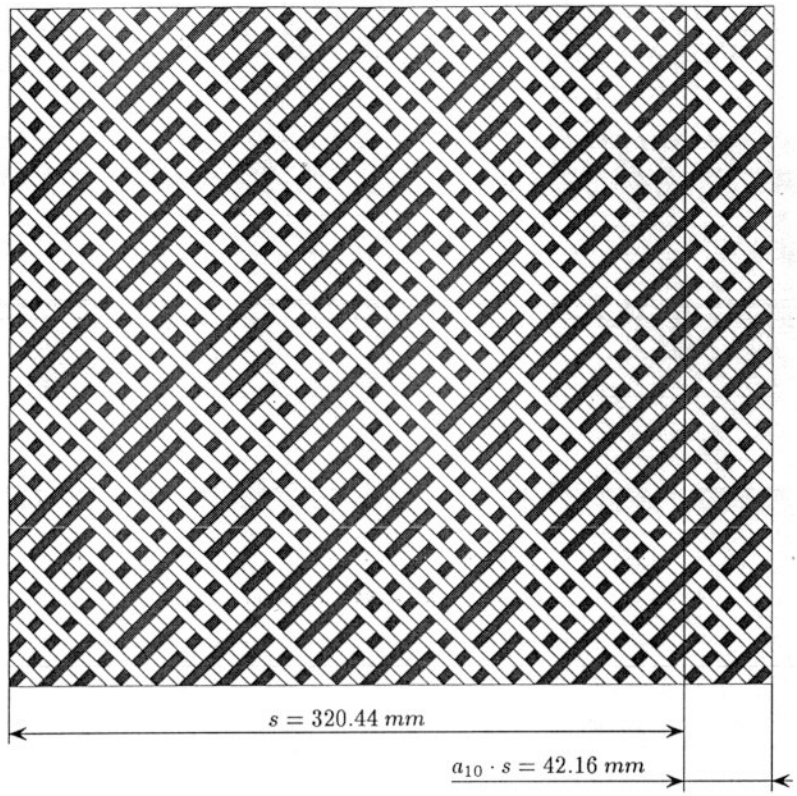
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/9



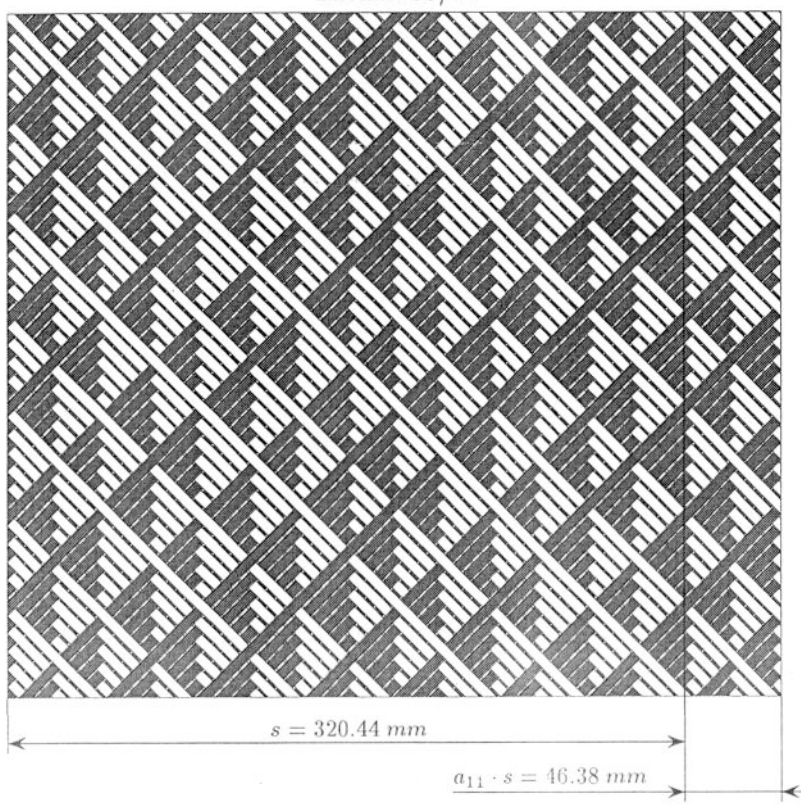
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/10



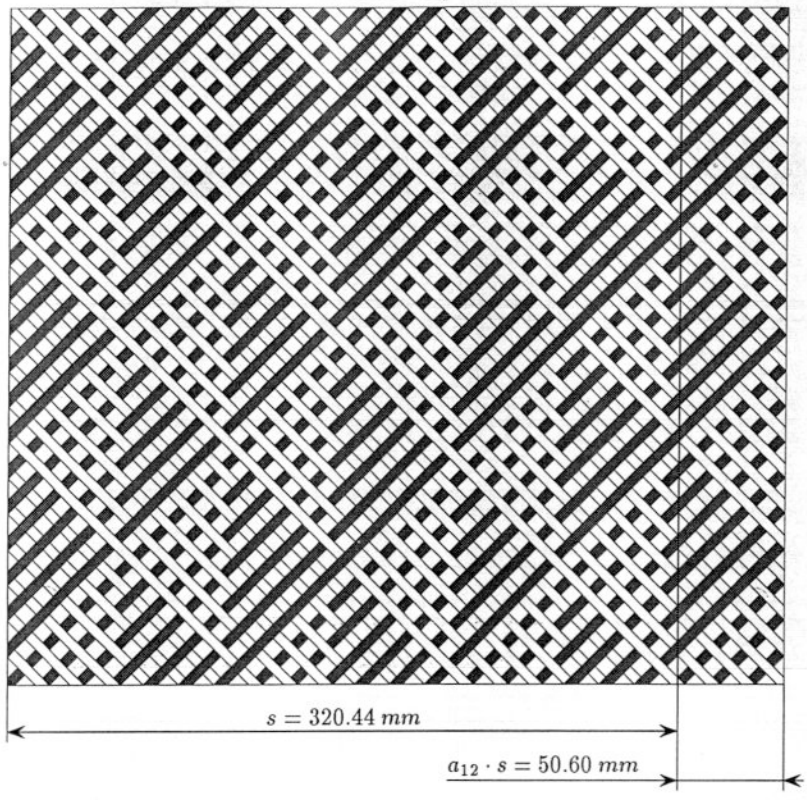
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/11



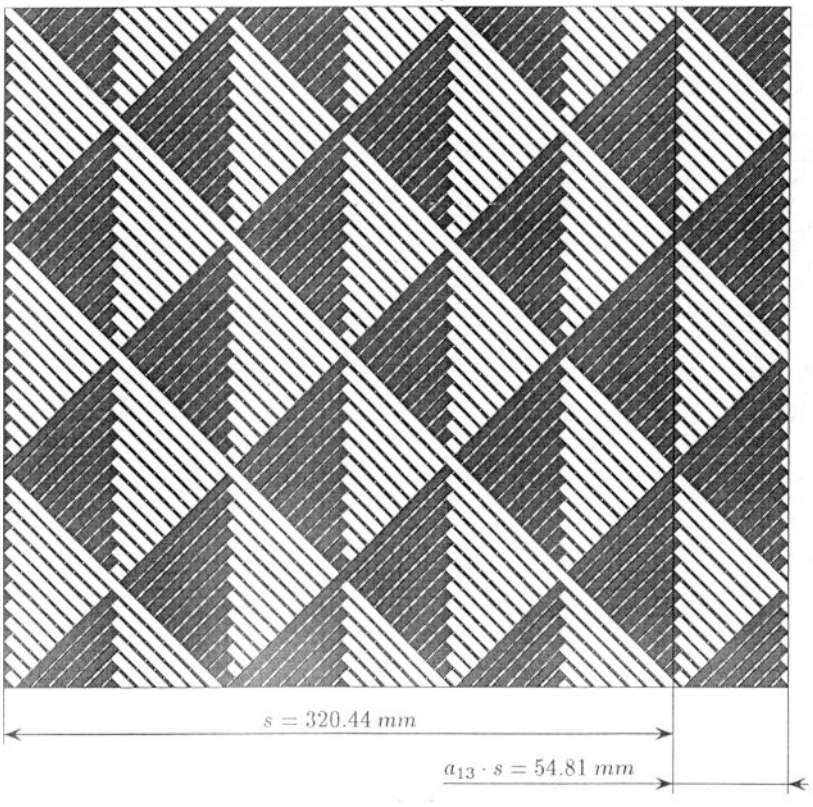
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/12



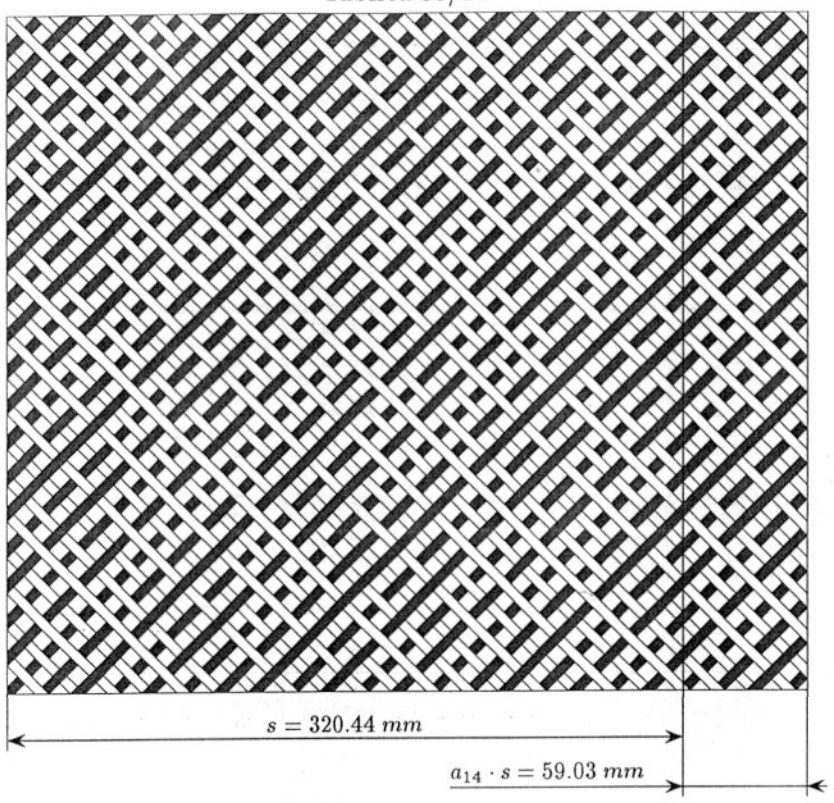
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/13



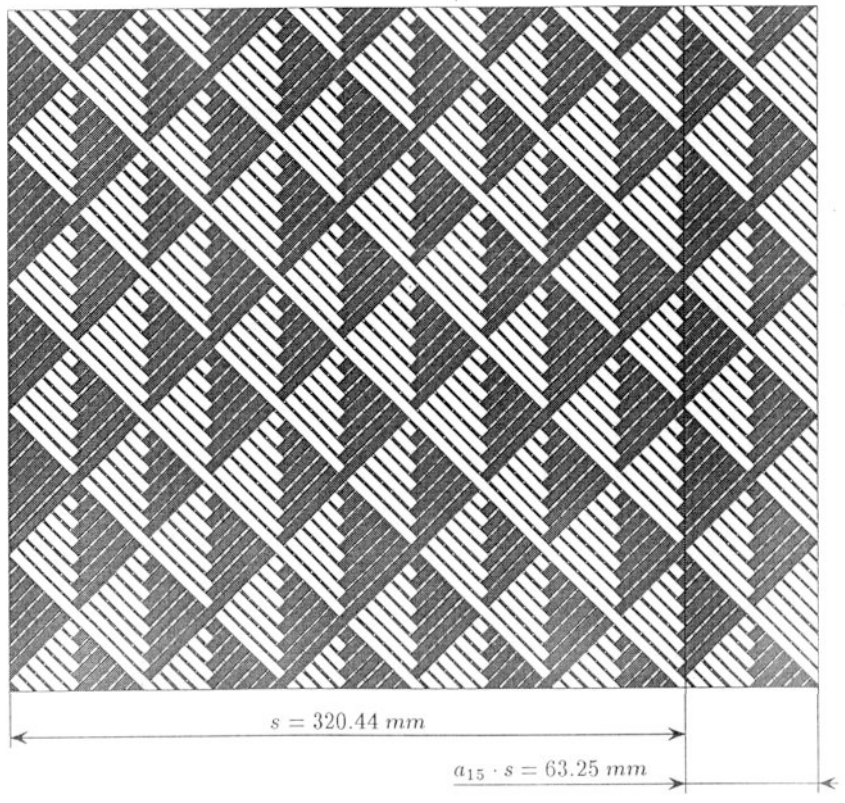
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/14



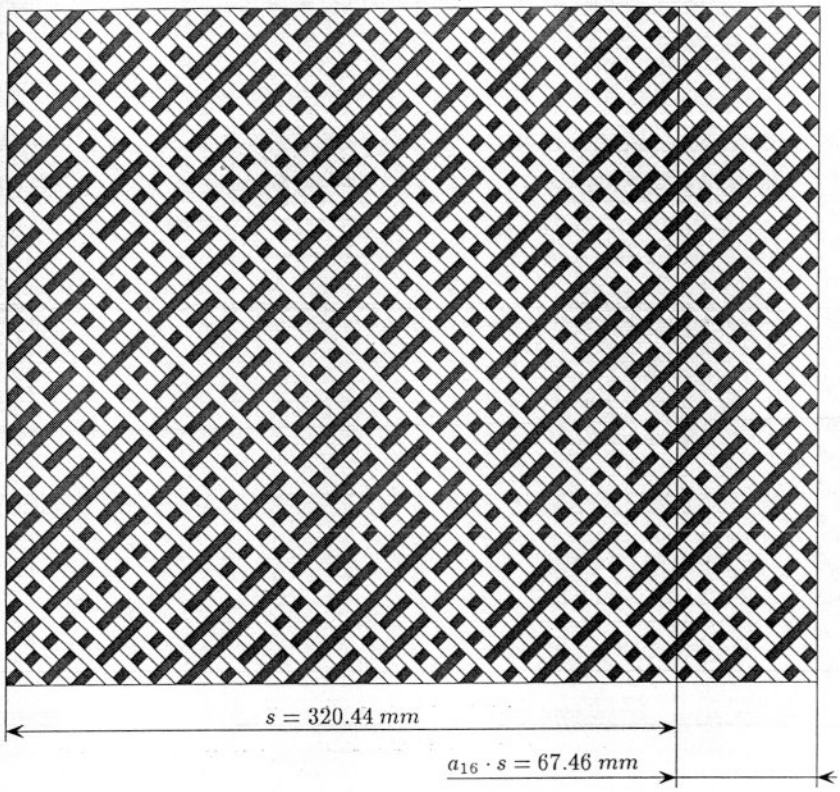
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/15



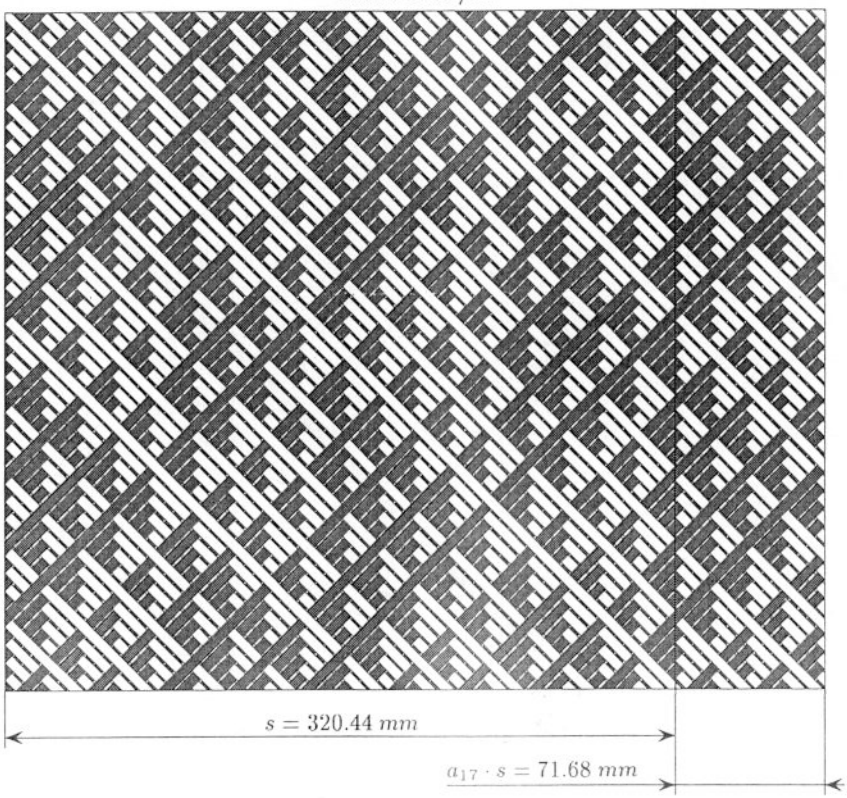
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/16



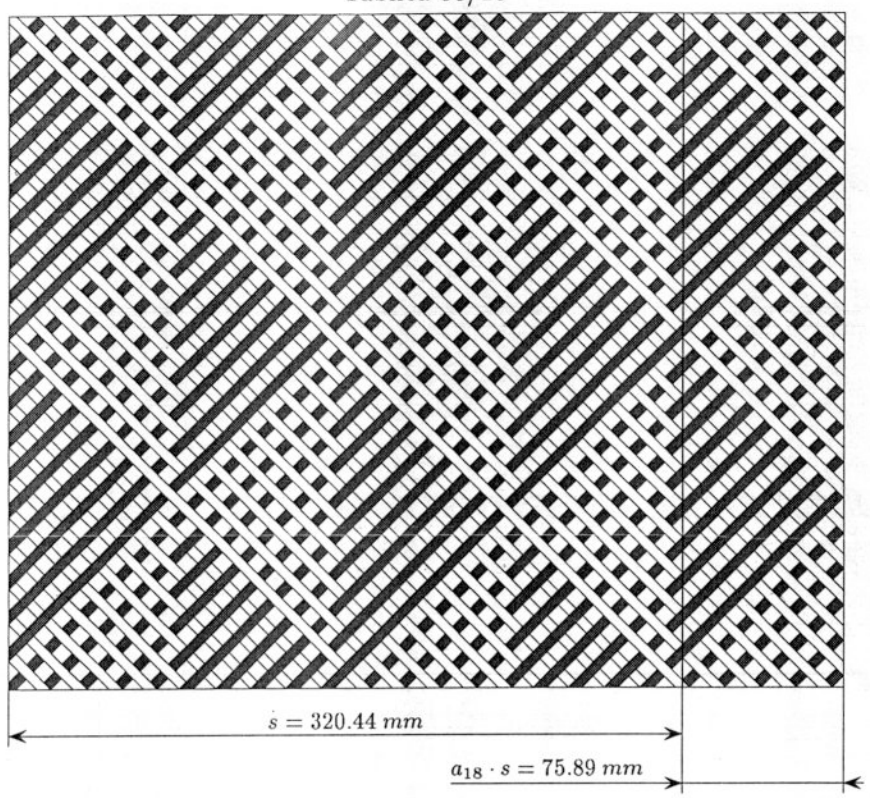
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/17



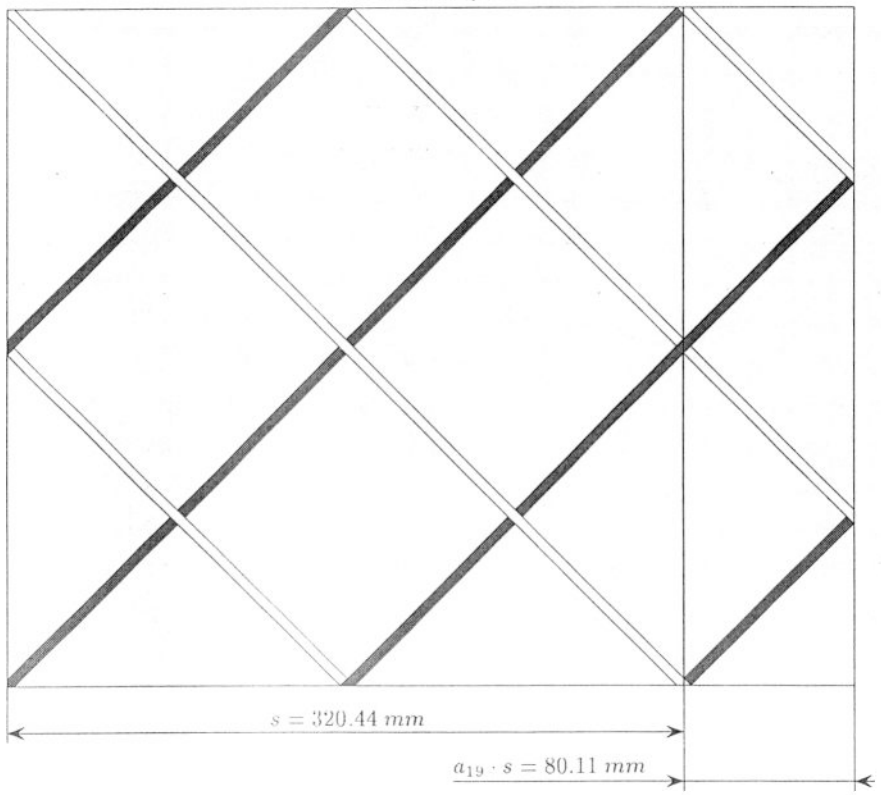
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 38/18



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

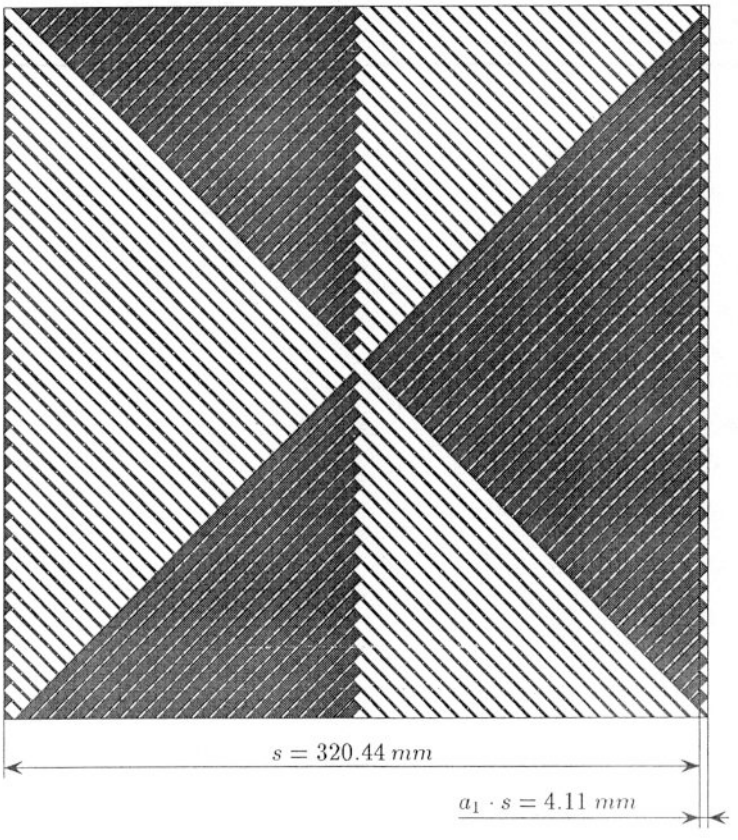
Tablica 38/19



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

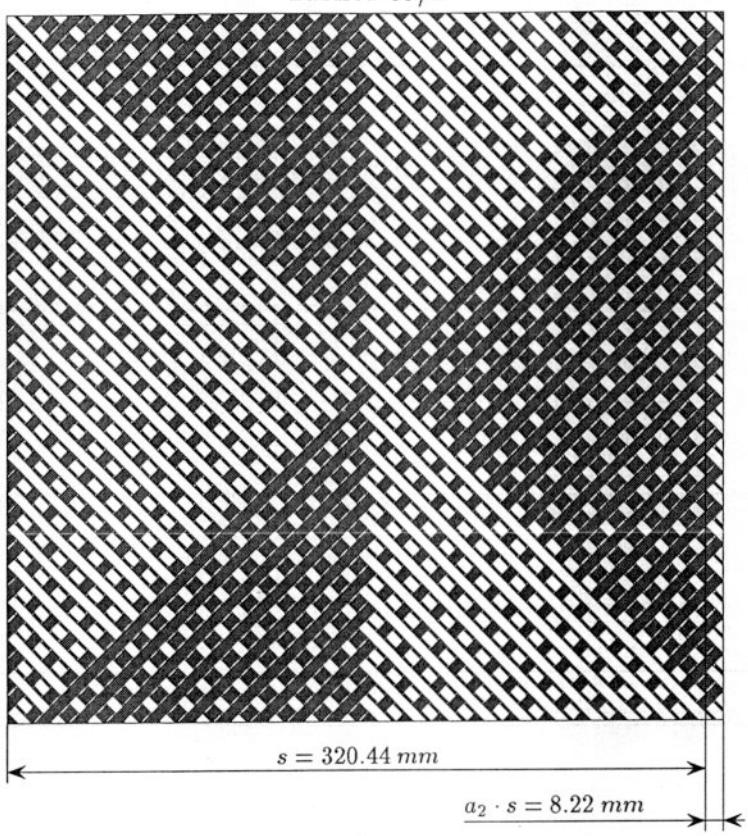
Liczba wiązek rowingu: 39																																						$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																						$= Nr/(2 \cdot 39)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	1/78
2	20	1	21	2	22	3	23	4	24	5	25	6	26	7	27	8	28	9	29	10	30	11	31	12	32	13	33	14	34	15	35	16	36	17	37	18	38	19	39	2/78
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	0	0	9	0	0	10	0	0	11	0	0	12	0	0	13	3/78
4	10	20	30	1	11	21	31	2	12	22	32	3	13	23	33	4	14	24	34	5	15	25	35	6	16	26	36	7	17	27	37	8	18	28	38	9	19	29	39	4/78
5	8	16	24	32	1	9	17	25	33	2	10	18	26	34	3	11	19	27	35	4	12	20	28	36	5	13	21	29	37	6	14	22	30	38	7	15	23	31	39	5/78
6	0	0	7	0	0	1	0	0	8	0	0	2	0	0	9	0	0	3	0	0	10	0	0	4	0	0	11	0	0	5	0	0	12	0	0	6	0	0	13	6/78
7	28	17	6	34	23	12	1	29	18	7	35	24	13	2	30	19	8	36	25	14	3	31	20	9	37	26	15	4	32	21	10	38	27	16	5	33	22	11	39	7/78
8	5	10	15	20	25	30	35	1	6	11	16	21	26	31	36	2	7	12	17	22	27	32	37	3	8	13	18	23	28	33	38	4	9	14	19	24	29	34	39	8/78
9	0	0	9	0	0	5	0	0	1	0	0	10	0	0	6	0	0	2	0	0	11	0	0	7	0	0	3	0	0	12	0	0	8	0	0	4	0	0	13	9/78
10	4	8	12	16	20	24	28	32	36	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38	3	7	11	15	19	23	27	31	35	39	10/78
11	32	25	18	11	4	36	29	22	15	8	1	33	26	19	12	5	37	30	23	16	9	2	34	27	20	13	6	38	31	24	17	10	3	35	28	21	14	7	39	11/78
12	0	0	10	0	0	7	0	0	4	0	0	1	0	0	11	0	0	8	0	0	5	0	0	2	0	0	12	0	0	9	0	0	6	0	0	3	0	0	13	12/78
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	13/78
14	14	28	3	17	31	6	20	34	9	23	37	12	26	1	15	29	4	18	32	7	21	35	10	24	38	13	27	2	16	30	5	19	33	8	22	36	11	25	39	14/78
15	0	0	8	0	0	3	0	0	11	0	0	6	0	0	1	0	0	9	0	0	4	0	0	12	0	0	7	0	0	2	0	0	10	0	0	5	0	0	13	15/78
16	22	5	27	10	32	15	37	20	3	25	8	30	13	35	18	1	23	6	28	11	33	16	38	21	4	26	9	31	14	36	19	2	24	7	29	12	34	17	39	16/78
17	23	7	30	14	37	21	5	28	12	35	19	3	26	10	33	17	1	24	8	31	15	38	22	6	29	13	36	20	4	27	11	34	18	2	25	9	32	16	39	17/78
18	0	0	11	0	0	9	0	0	7	0	0	5	0	0	3	0	0	1	0	0	12	0	0	10	0	0	8	0	0	6	0	0	4	0	0	2	0	0	13	18/78
19	37	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	39	19/78

Tablica 39/1



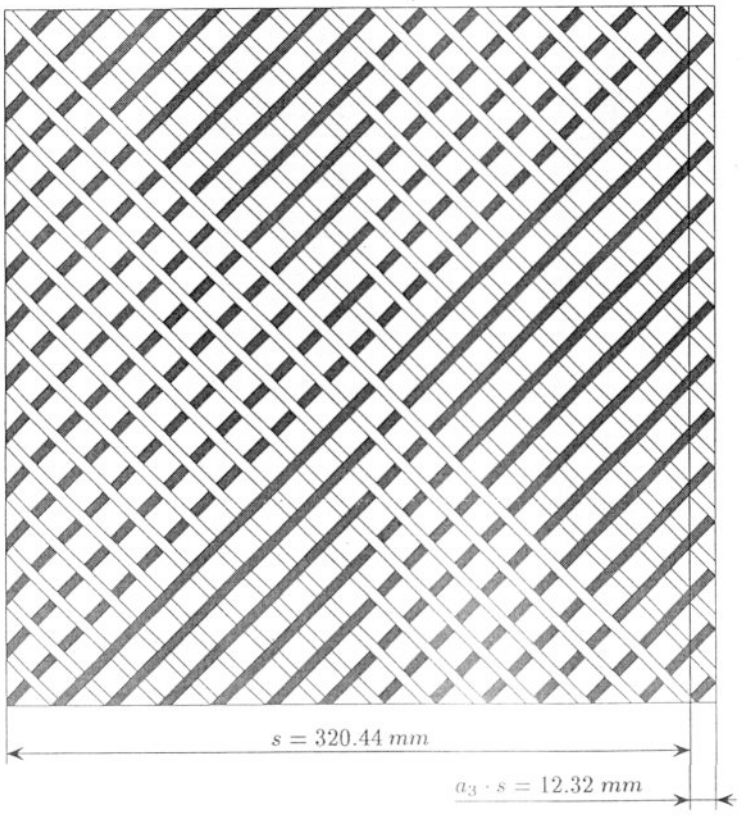
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/2



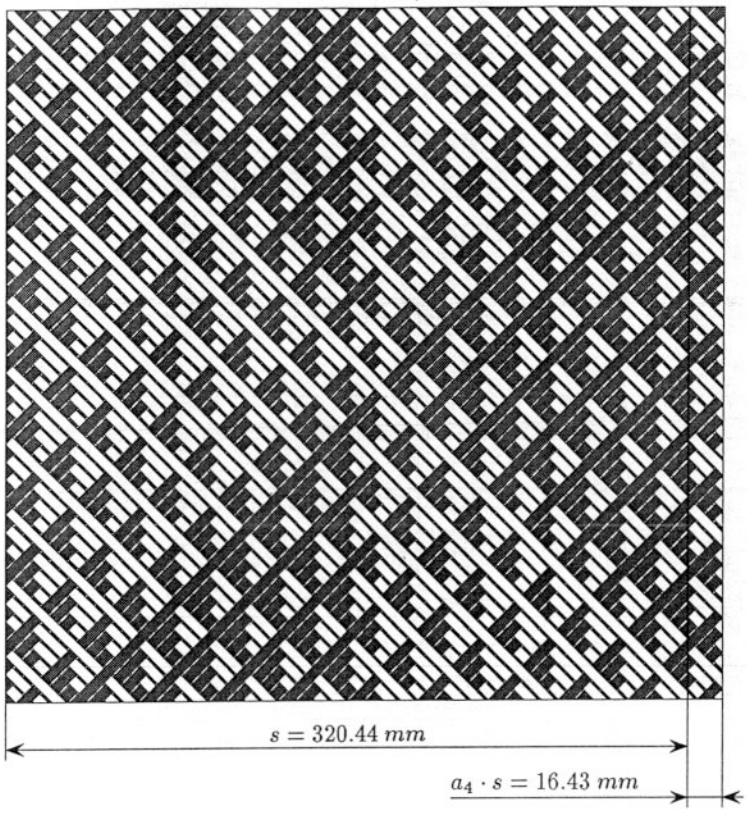
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/3



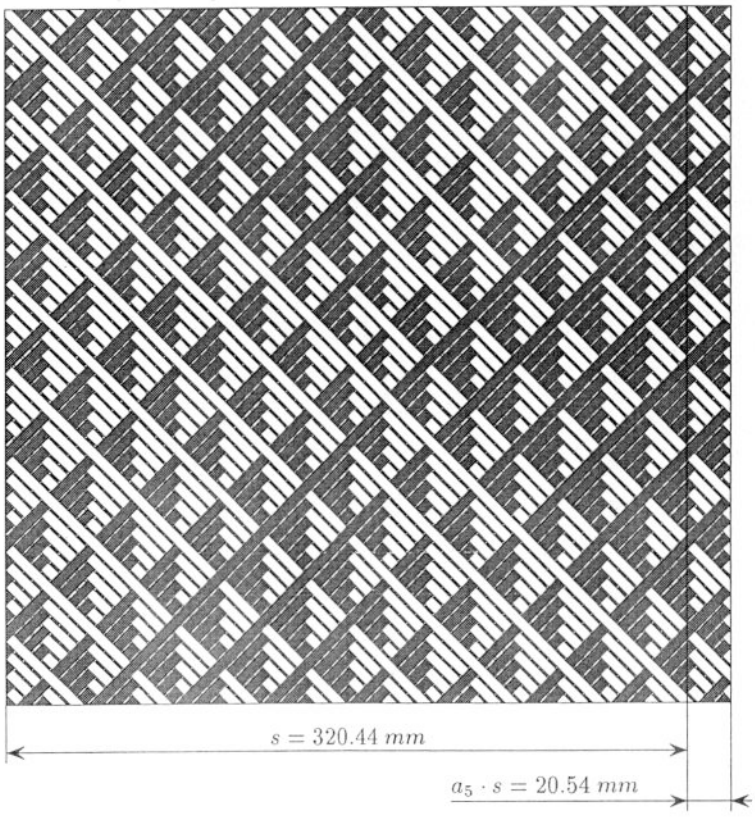
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/4



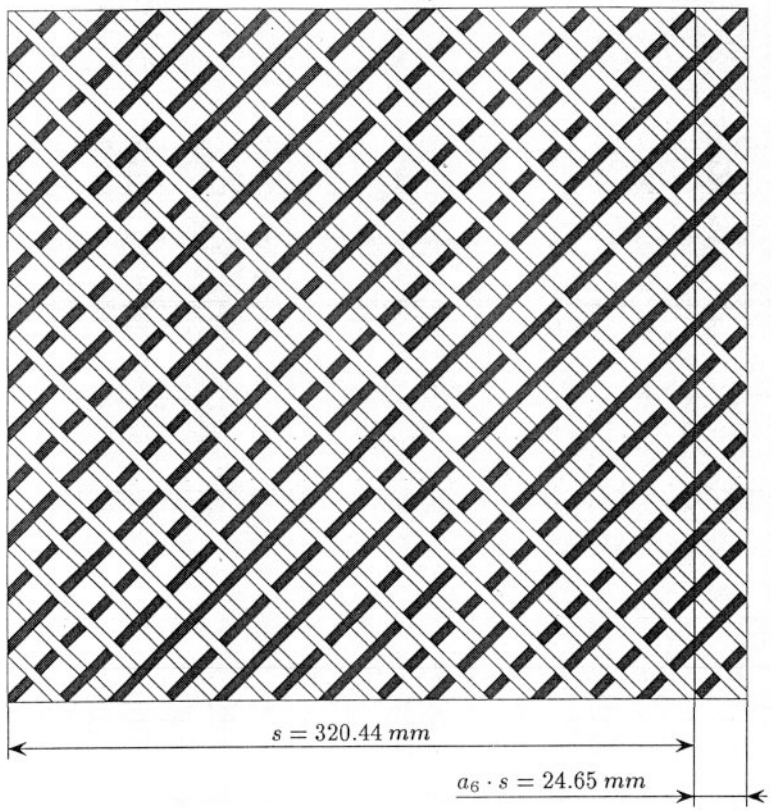
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 39/5



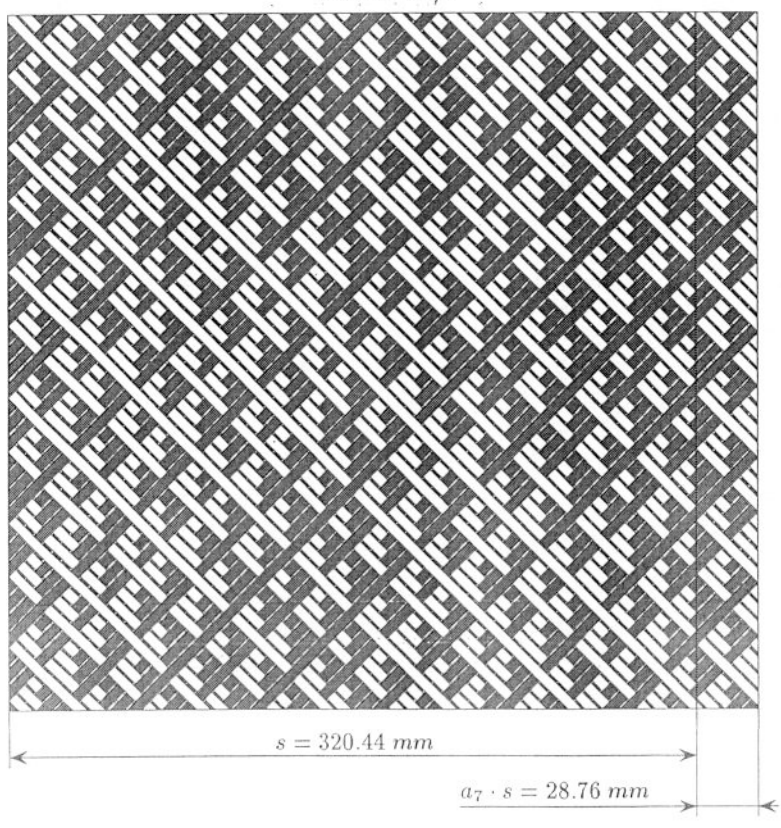
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 39/6



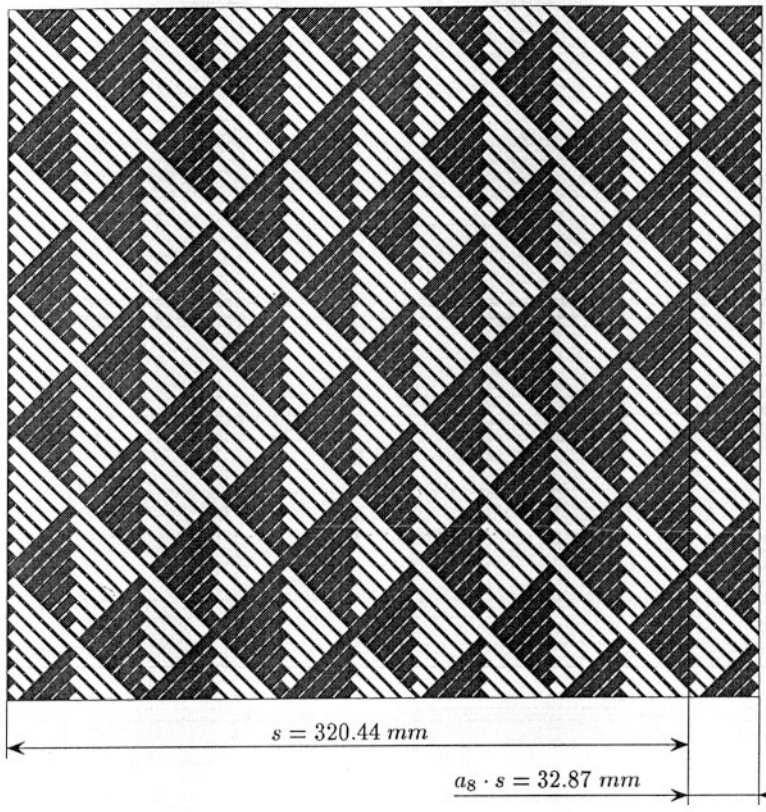
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/7



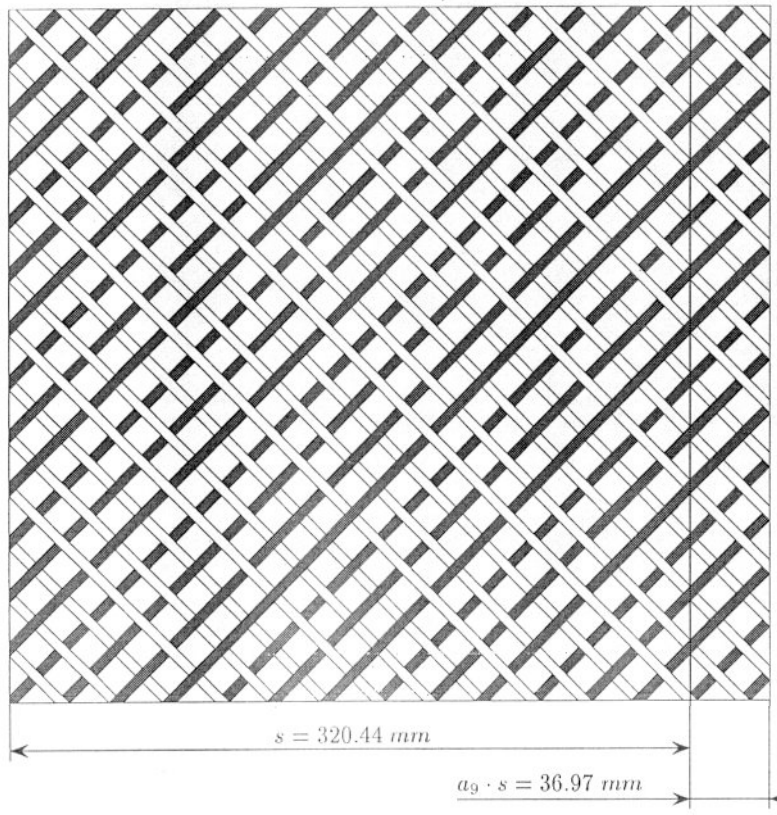
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/8



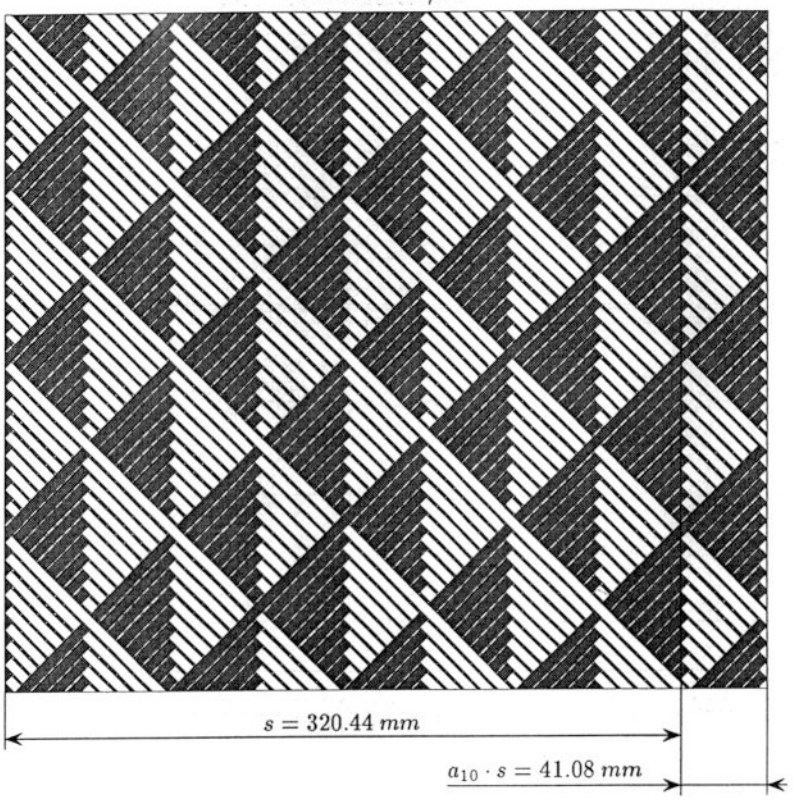
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/9



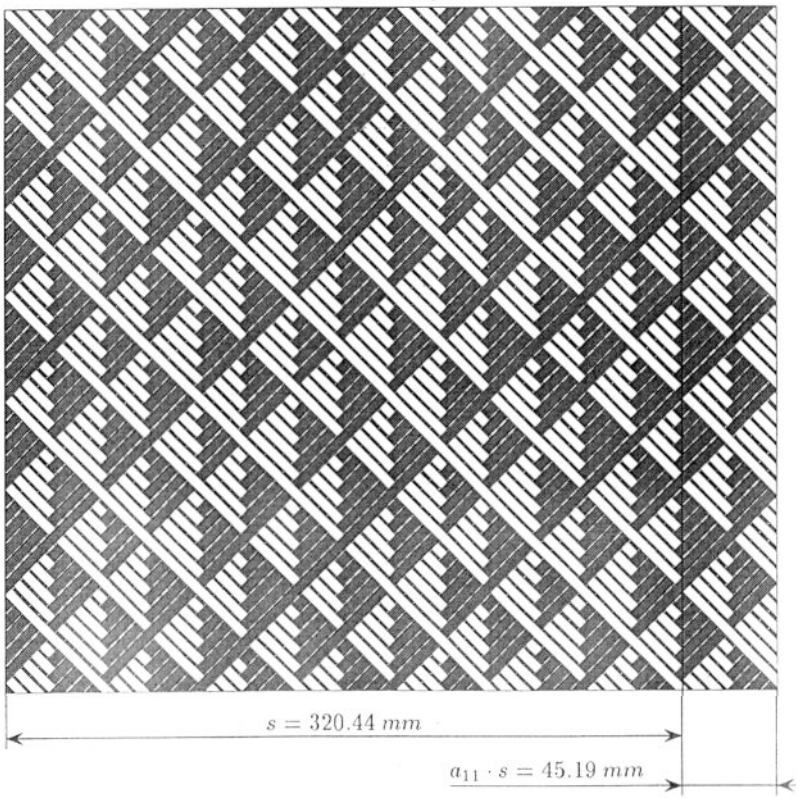
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/10



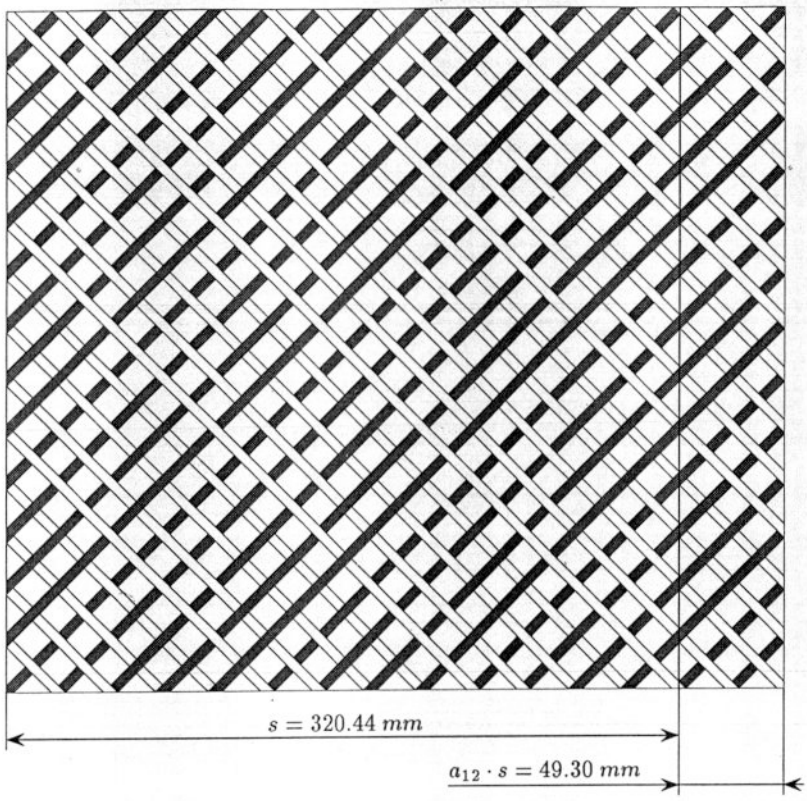
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/11



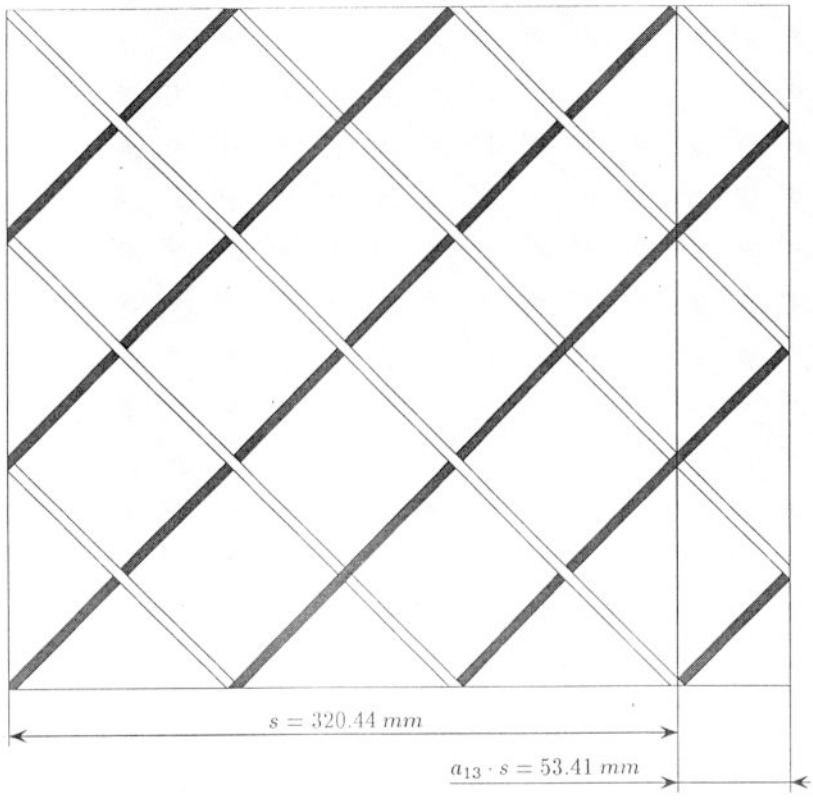
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/12



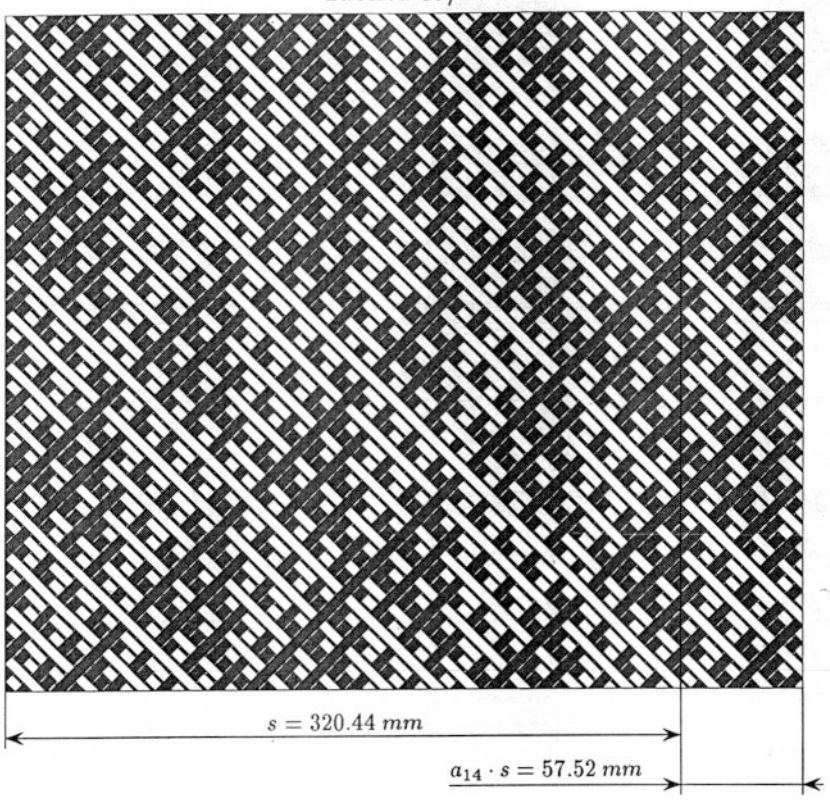
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/13



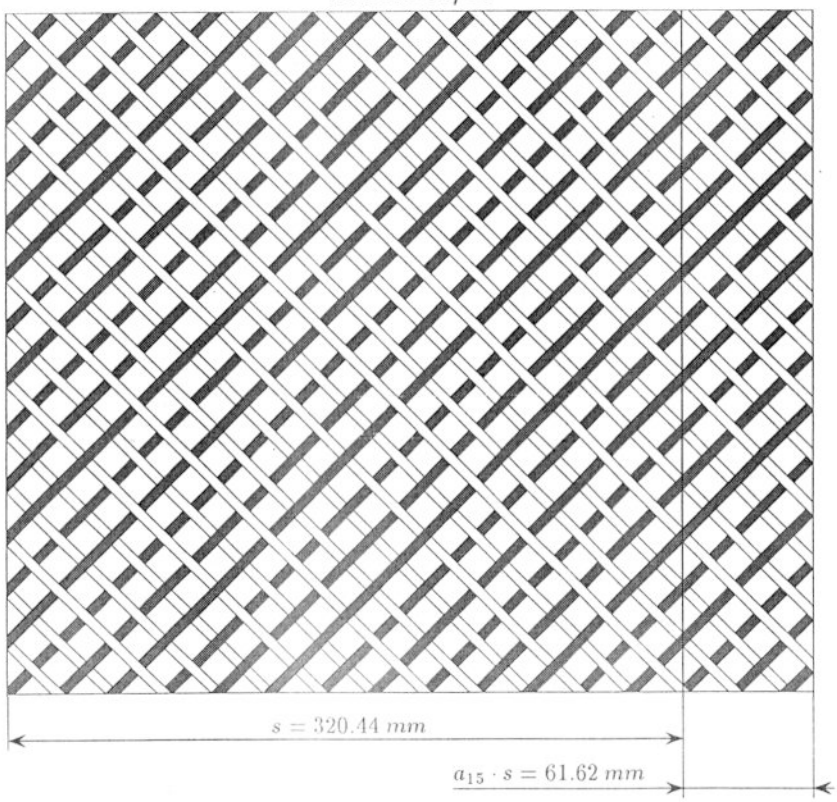
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/14



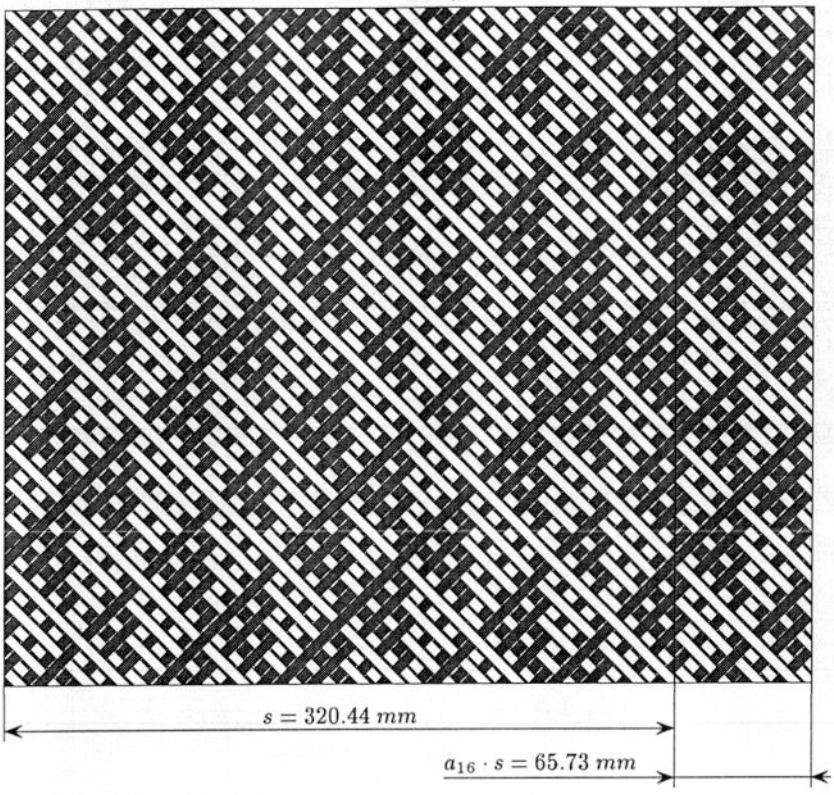
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/15



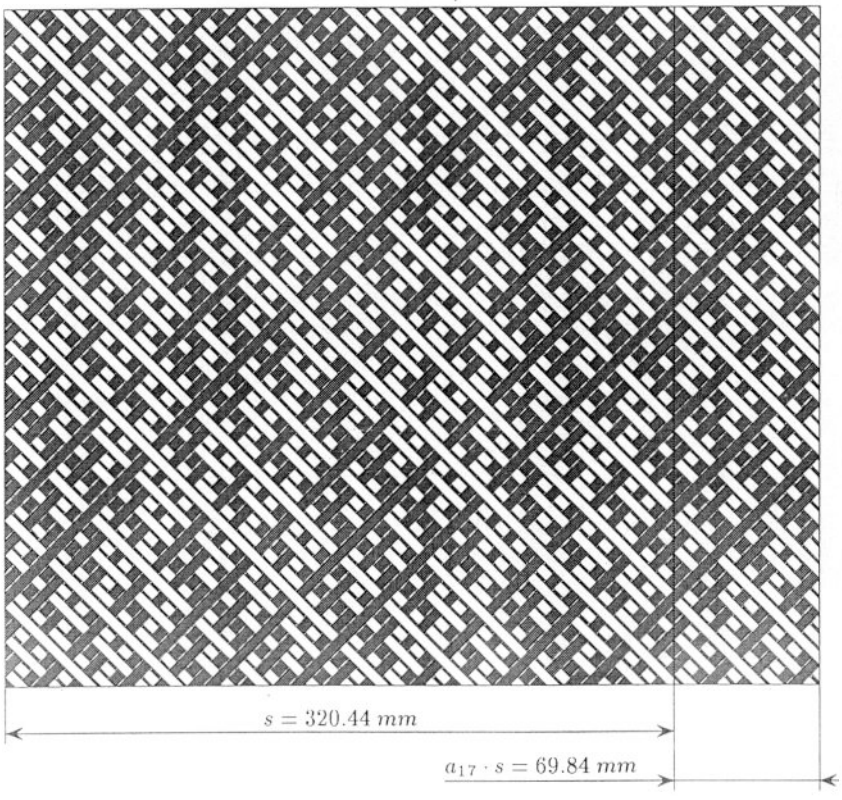
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/16



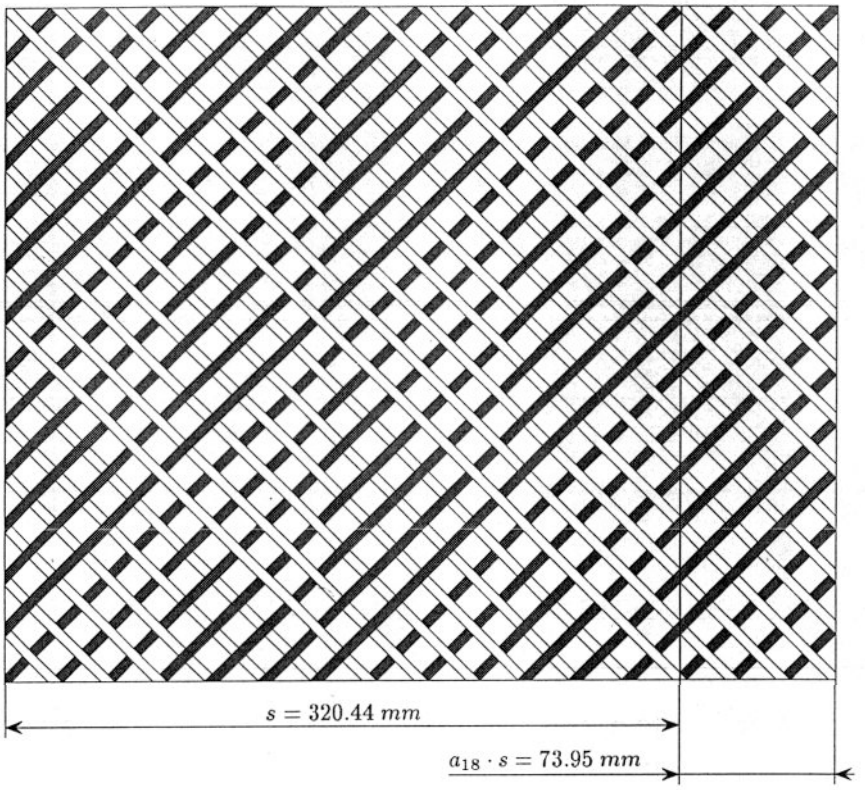
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/17



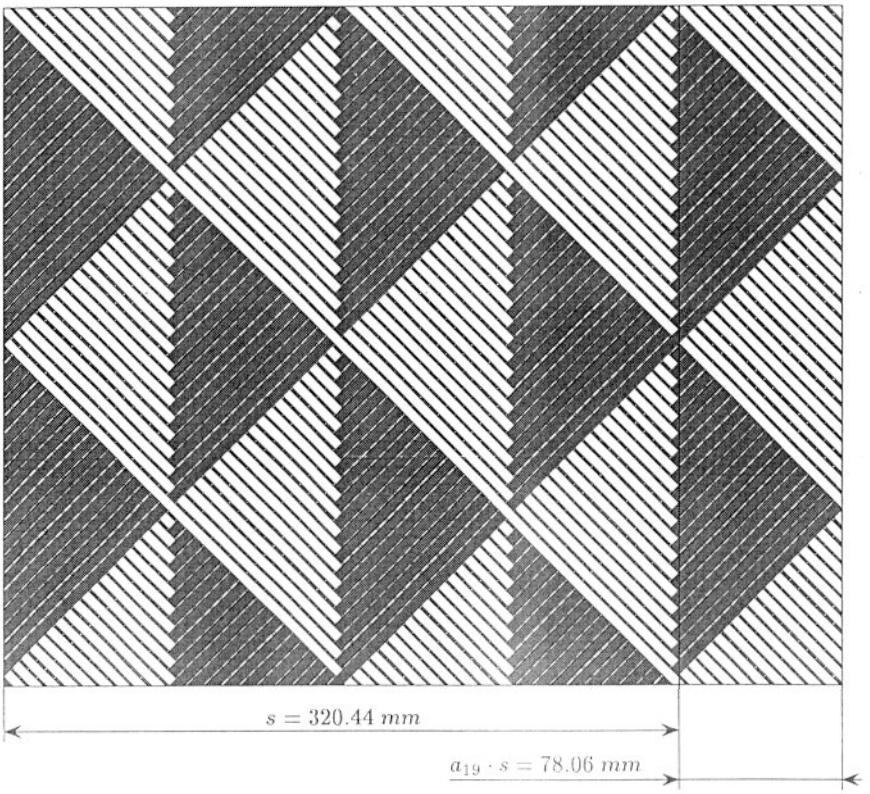
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 39/18



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

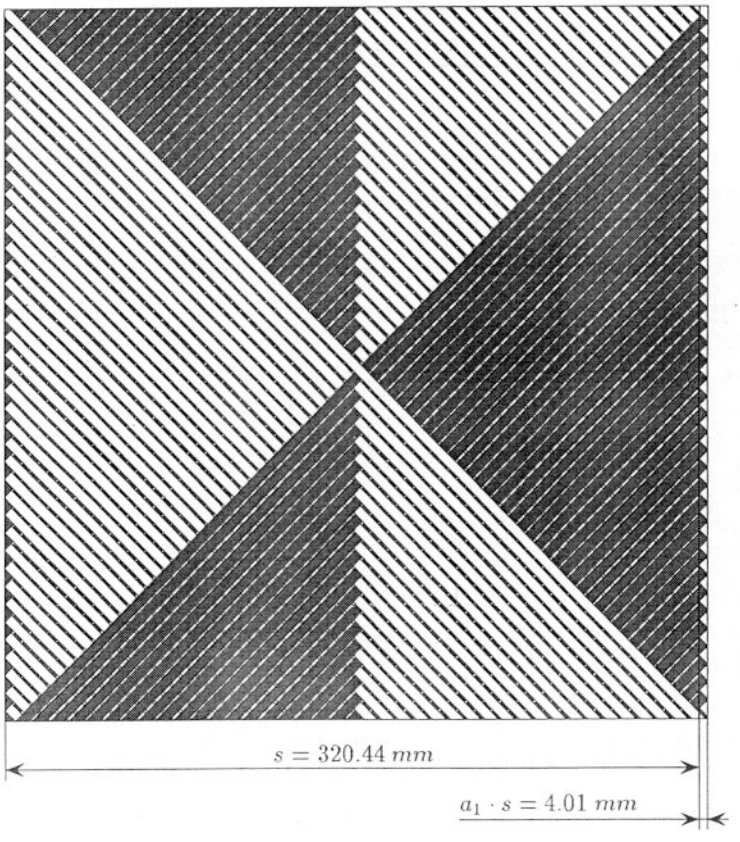
Tablica 39/19



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

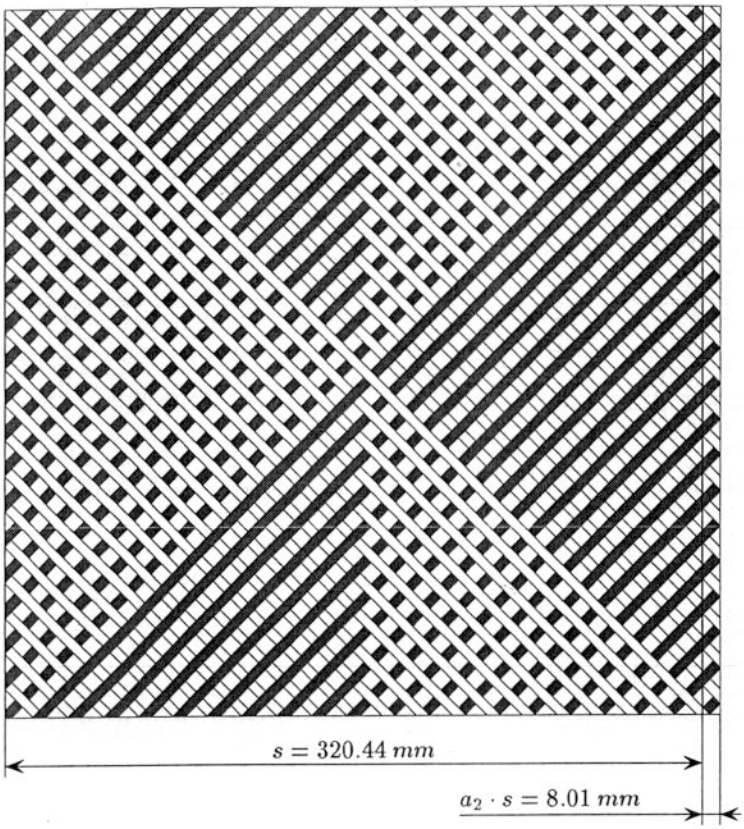
Liczba wiązek rowingu: 40																																						$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																						$= Nr/(2 \cdot 40)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	1/80
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	0	16	0	17	0	18	0	19	0	20	2/80
3	27	14	1	28	15	2	29	16	3	30	17	4	31	18	5	32	19	6	33	20	7	34	21	8	35	22	9	36	23	10	37	24	11	38	25	12	39	26	13	40	3/80
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0	5	0	0	0	6	0	0	0	7	0	0	0	8	0	0	0	9	0	0	0	10	4/80
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	5	0	0	0	0	6	0	0	0	0	7	0	0	0	0	8	5/80
6	0	7	0	14	0	1	0	8	0	15	0	2	0	9	0	16	0	3	0	10	0	17	0	4	0	11	0	18	0	5	0	12	0	19	0	6	0	13	0	20	6/80
7	23	6	29	12	35	18	1	24	7	30	13	36	19	2	25	8	31	14	37	20	3	26	9	32	15	38	21	4	27	10	33	16	39	22	5	28	11	34	17	40	7/80
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	5	8/80
9	9	18	27	36	5	14	23	32	1	10	19	28	37	6	15	24	33	2	11	20	29	38	7	16	25	34	3	12	21	30	39	8	17	26	35	4	13	22	31	40	9/80
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10/80
11	11	22	33	4	15	26	37	8	19	30	1	12	23	34	5	16	27	38	9	20	31	2	13	24	35	6	17	28	39	10	21	32	3	14	25	36	7	18	29	40	11/80
12	0	0	0	7	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	8	0	0	0	5	0	0	0	2	0	0	0	9	0	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0	10	12/80
13	37	34	31	28	25	22	19	16	13	10	7	4	1	38	35	32	29	26	23	20	17	14	11	8	5	2	39	36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	40	13/80
14	0	3	0	6	0	9	0	12	0	15	0	18	0	1	0	4	0	7	0	10	0	13	0	16	0	19	0	2	0	5	0	8	0	11	0	14	0	17	0	20	14/80
15	0	0	0	0	3	0	0	0	0	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	7	0	0	0	0	2	0	0	0	0	5	0	0	0	0	8	15/80
16	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5	16/80
17	33	26	19	12	5	38	31	24	17	10	3	36	29	22	15	8	1	34	27	20	13	6	39	32	25	18	11	4	37	30	23	16	9	2	35	28	21	14	7	40	17/80
18	0	9	0	18	0	7	0	16	0	5	0	14	0	3	0	12	0	1	0	10	0	19	0	8	0	17	0	6	0	15	0	4	0	13	0	2	0	11	0	20	18/80
19	19	38	17	36	15	34	13	32	11	30	9	28	7	26	5	24	3	22	1	20	39	18	37	16	35	14	33	12	31	10	29	8	27	6	25	4	23	2	21	40	19/80
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	20/80

Tablica 40/1



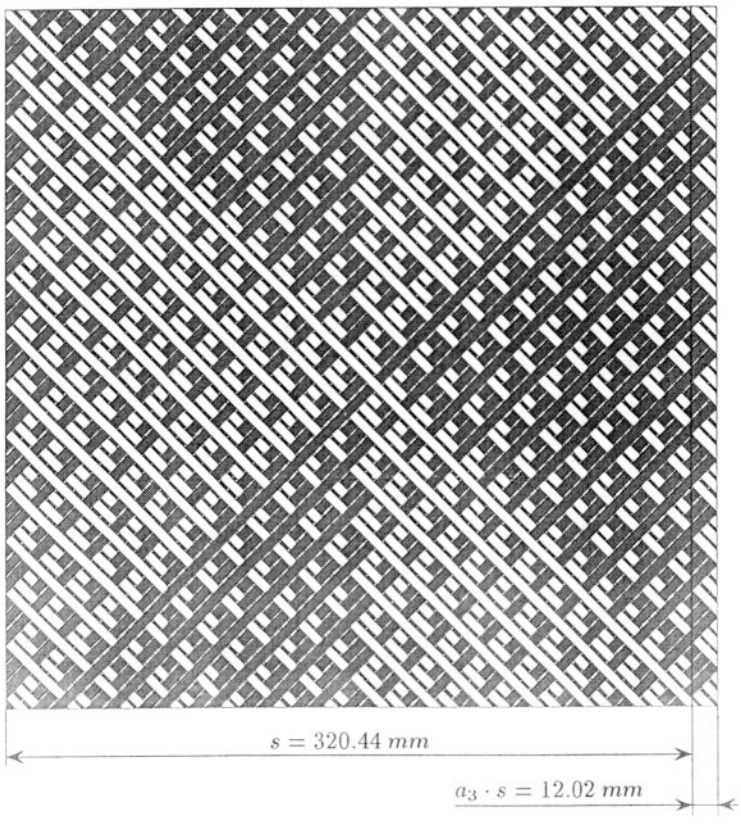
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/2



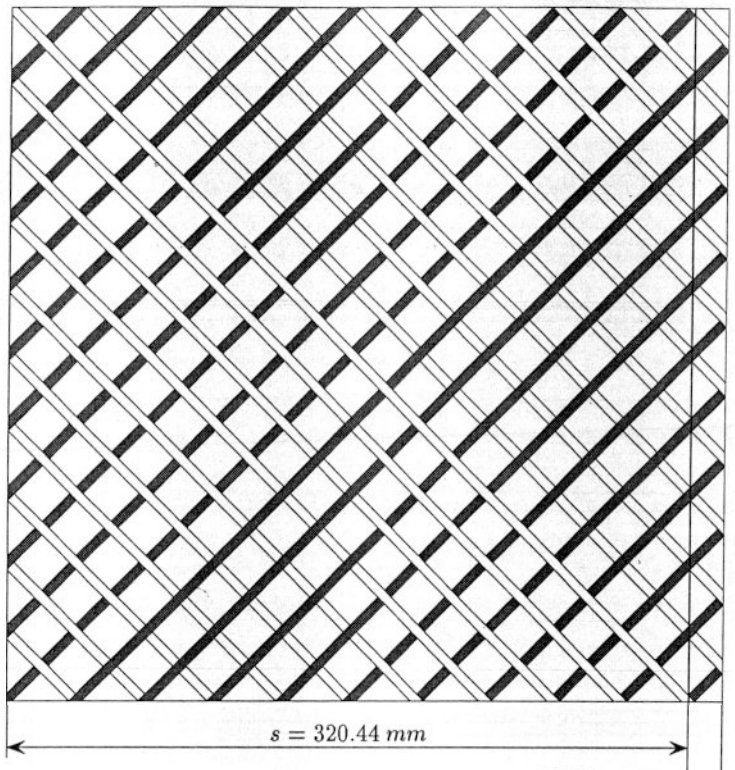
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/3



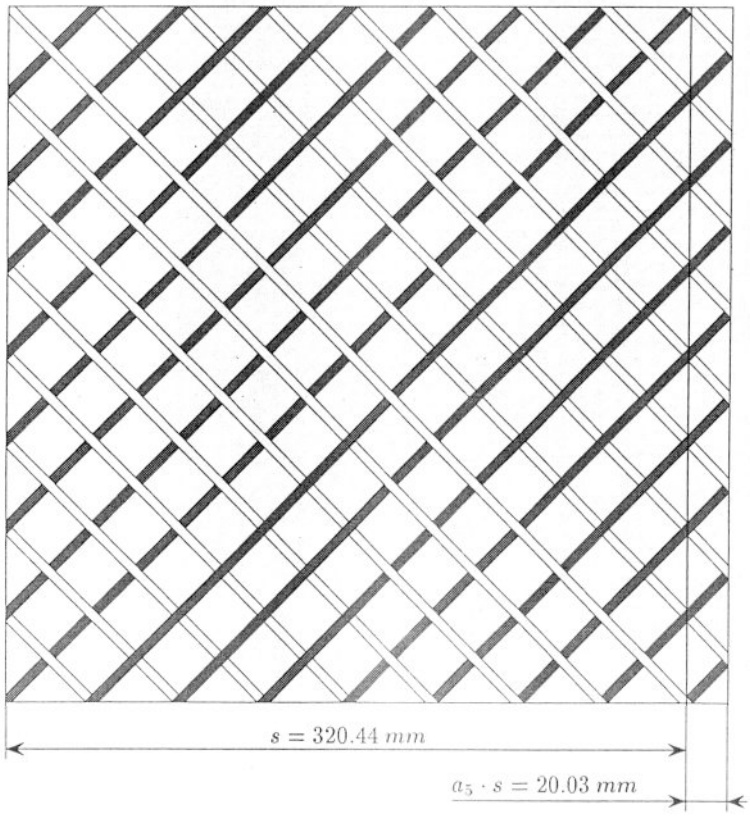
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/4



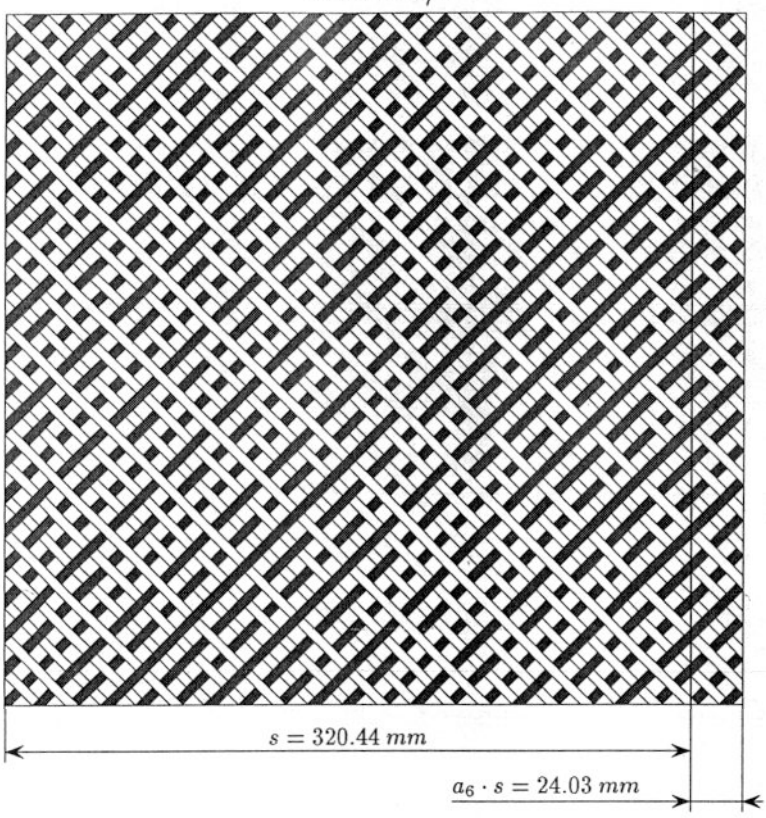
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/5



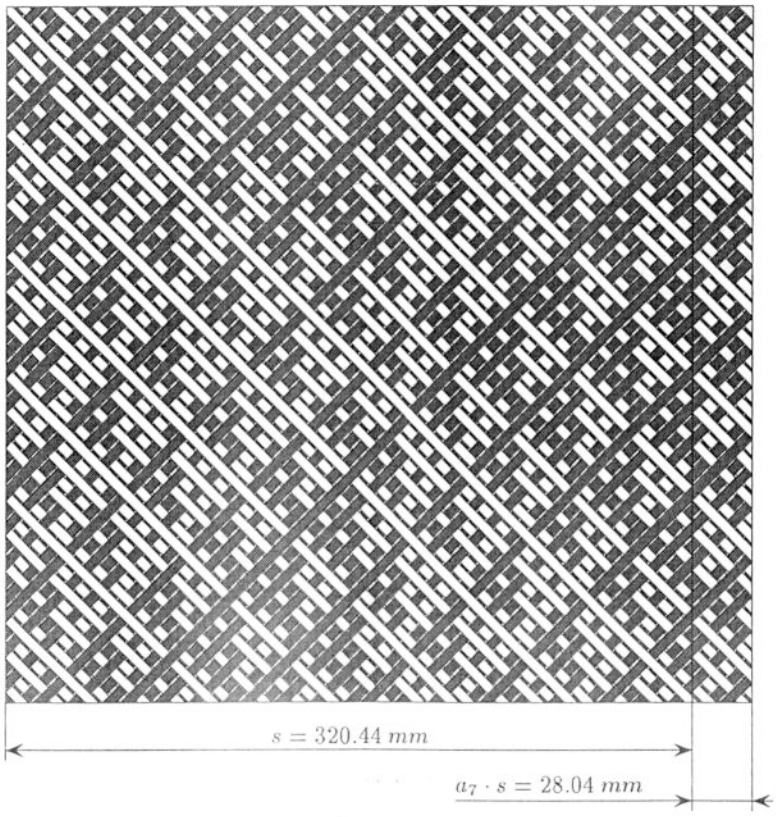
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/6



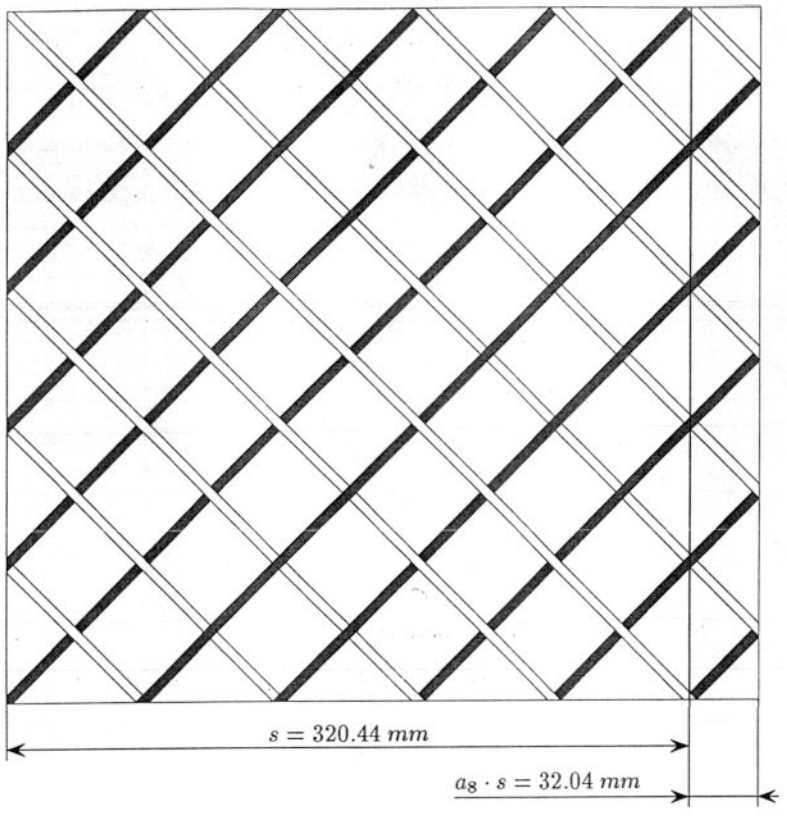
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/7



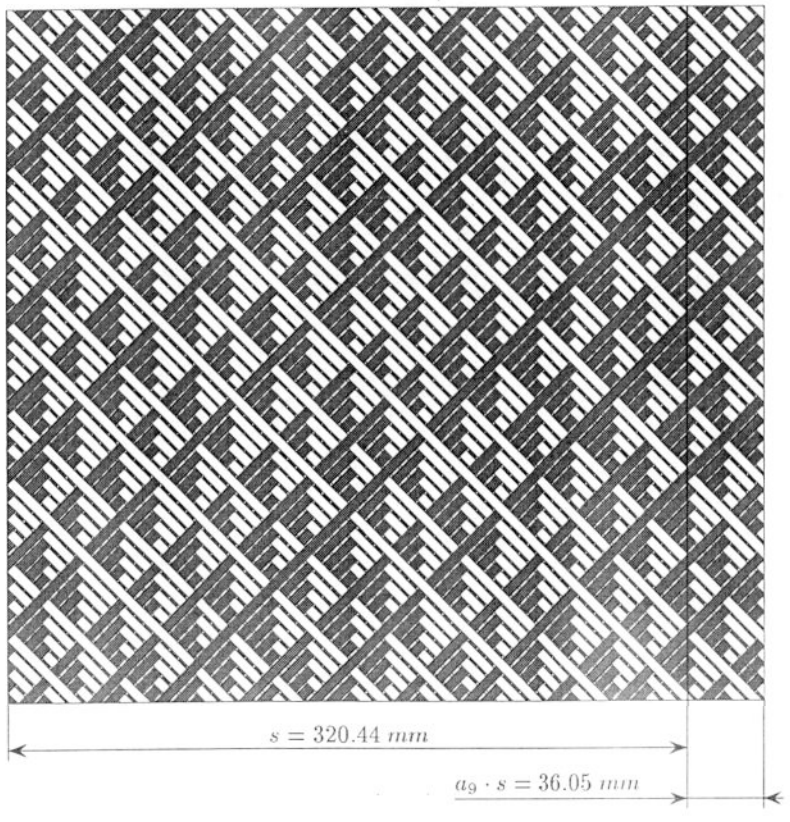
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/8



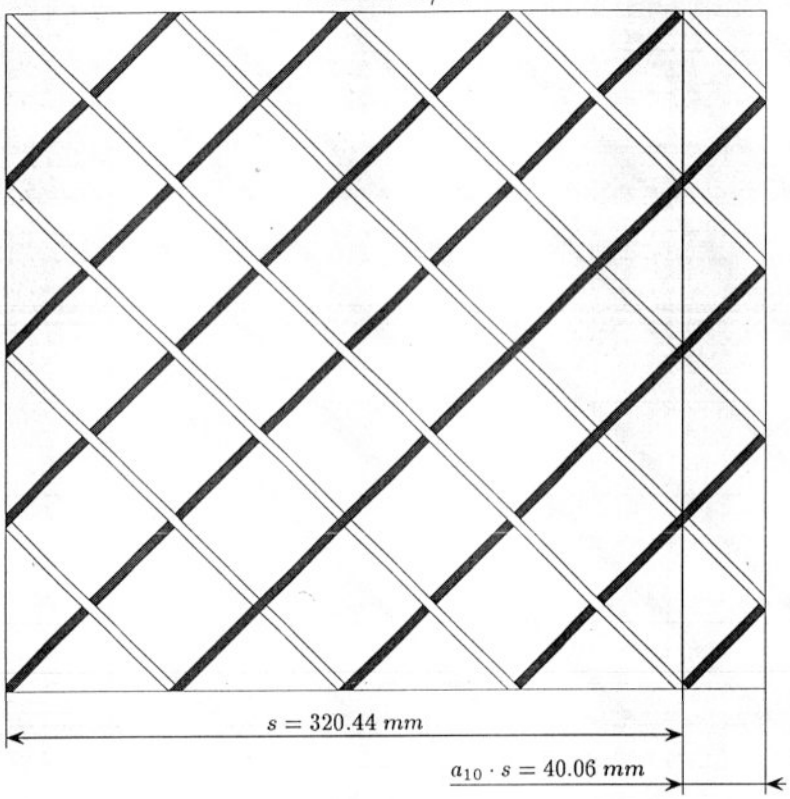
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/9



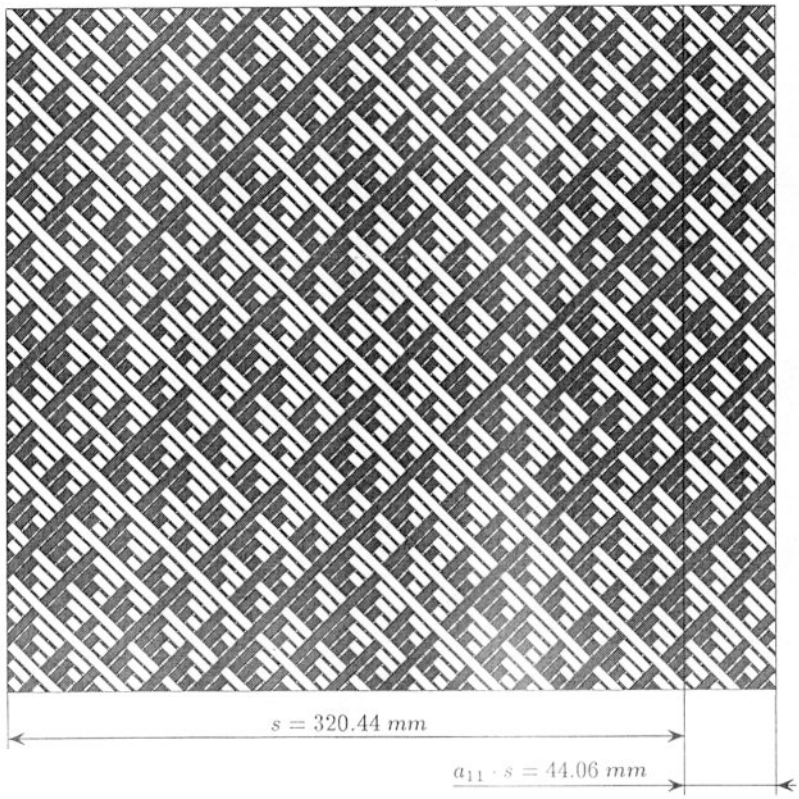
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/10



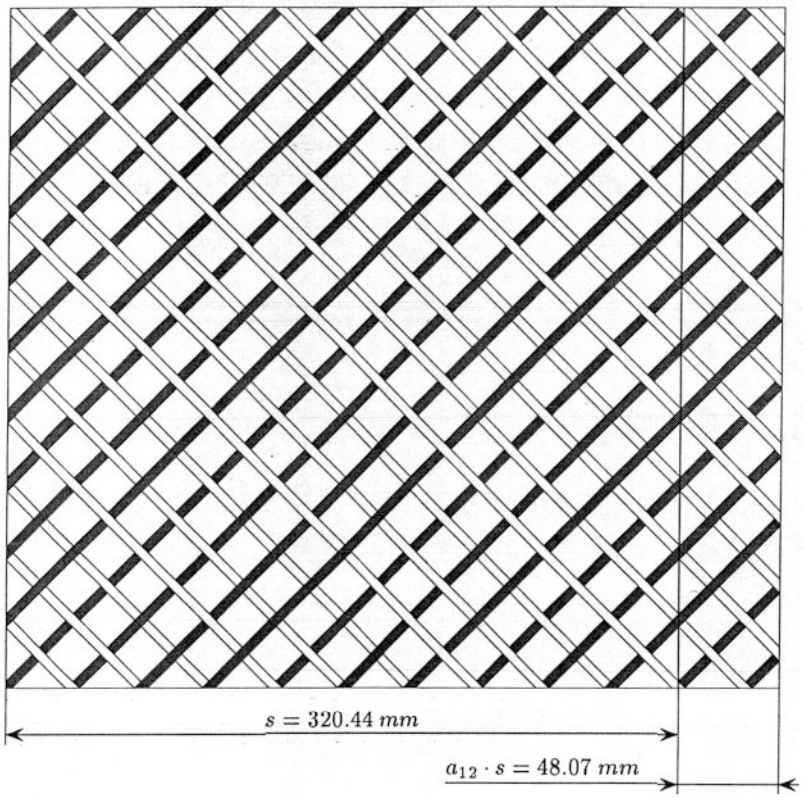
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/11



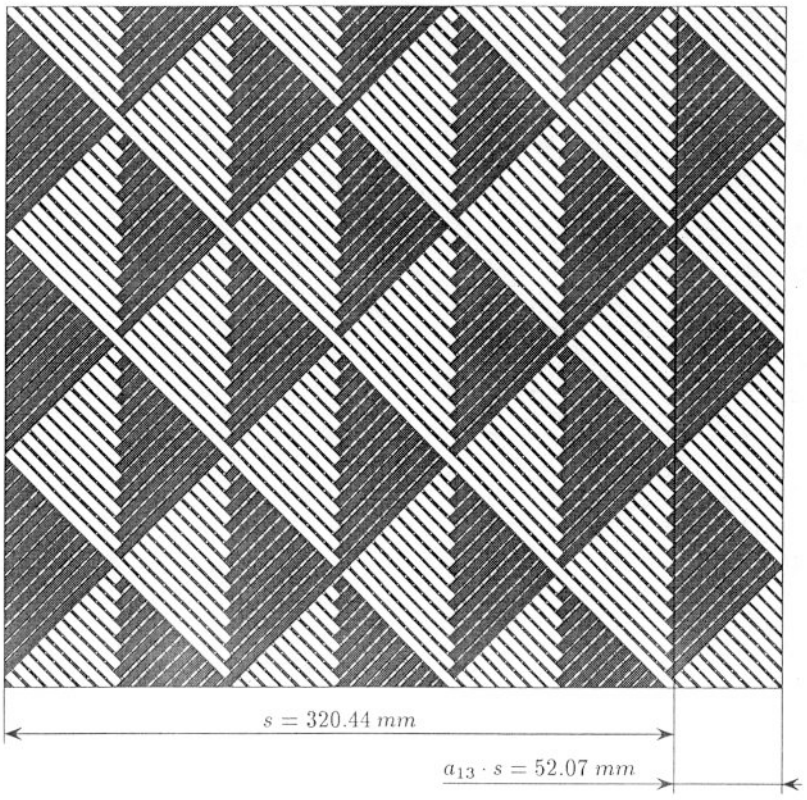
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/12



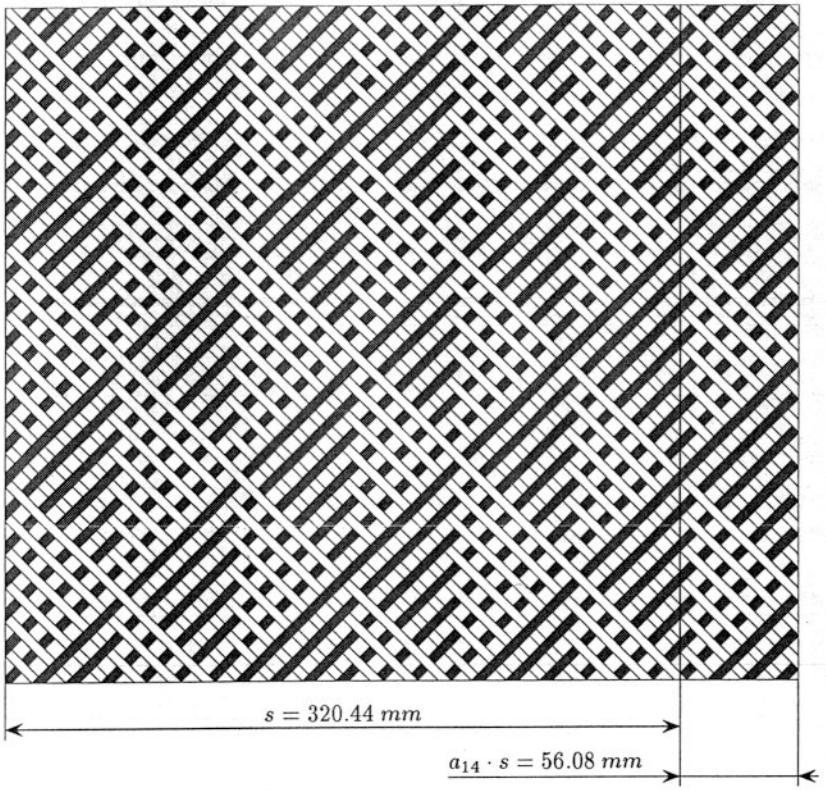
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/13



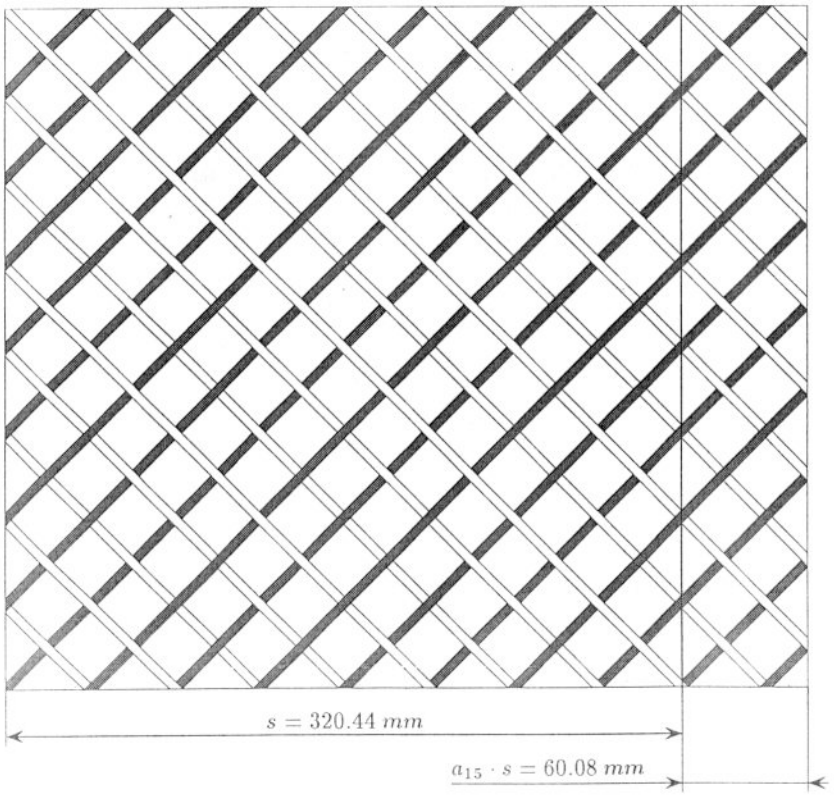
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/14



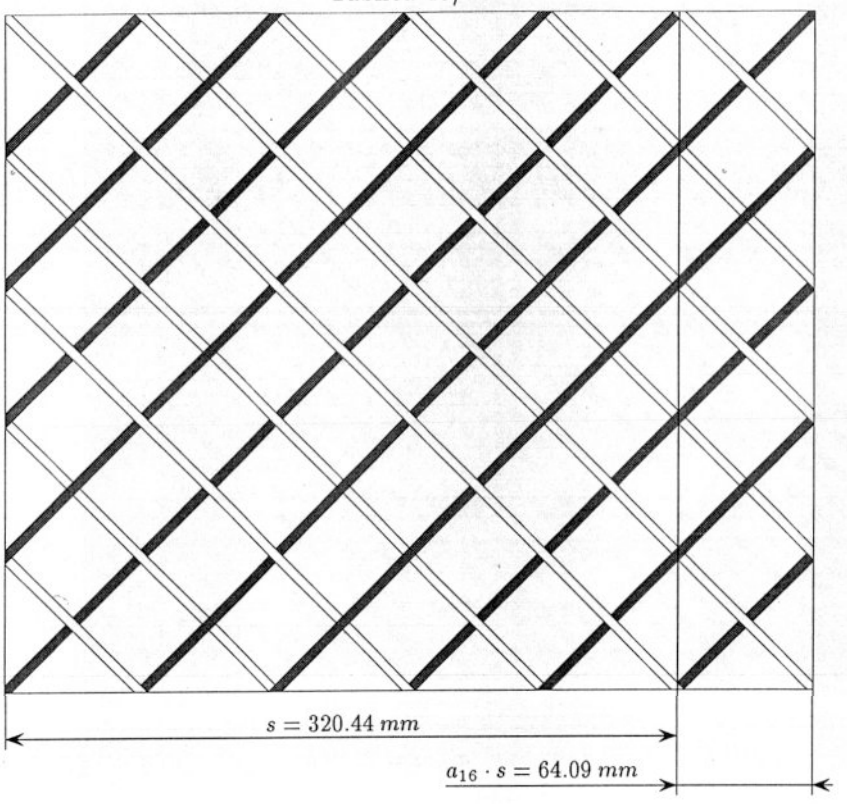
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/15



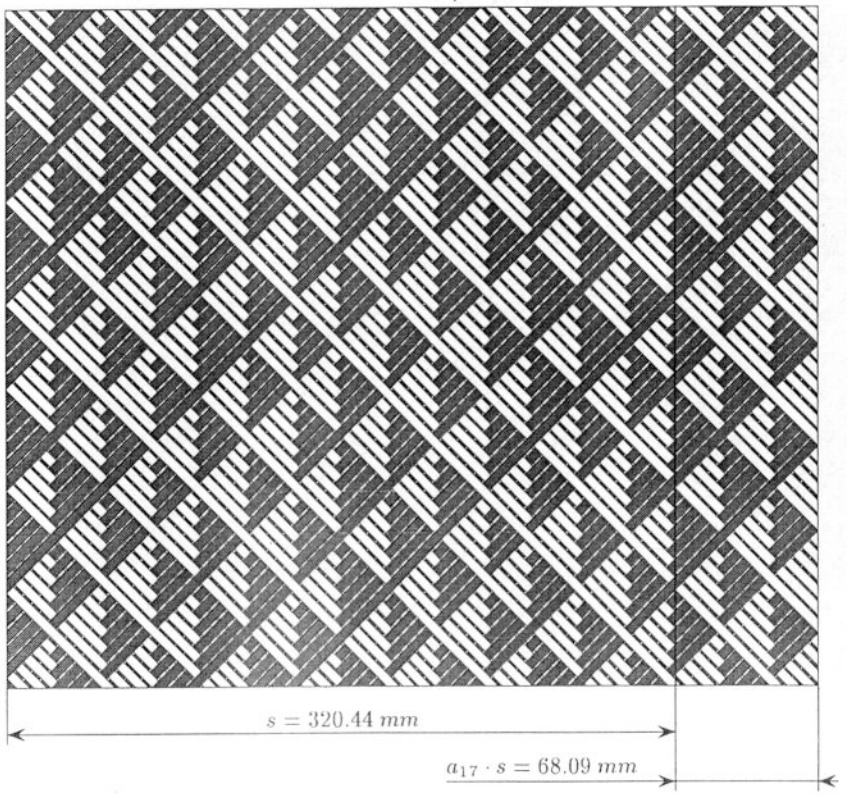
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/16



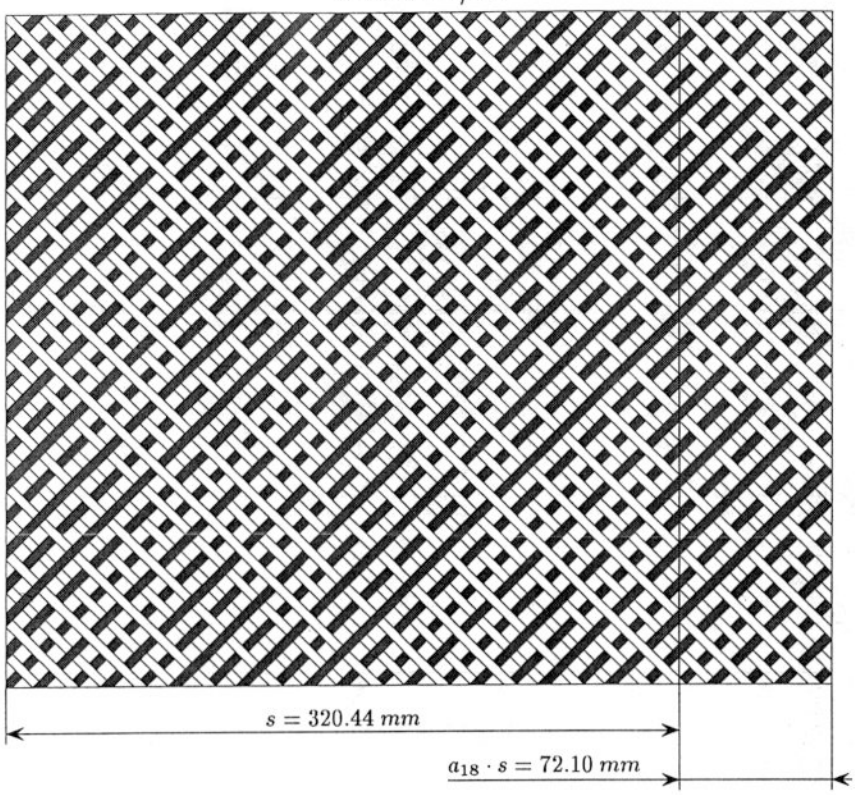
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/17



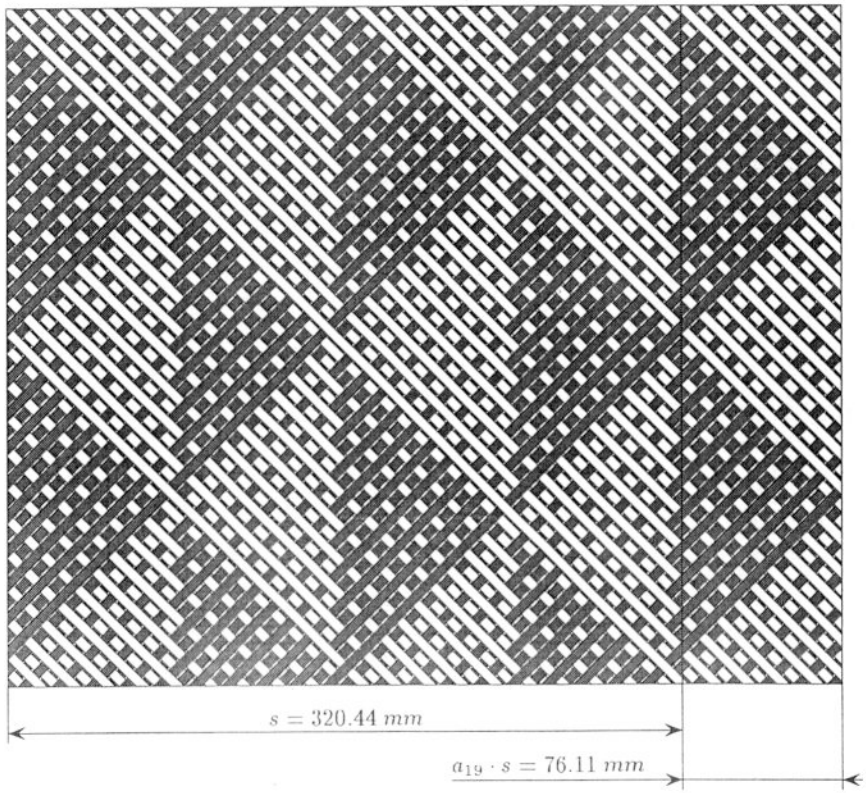
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/18



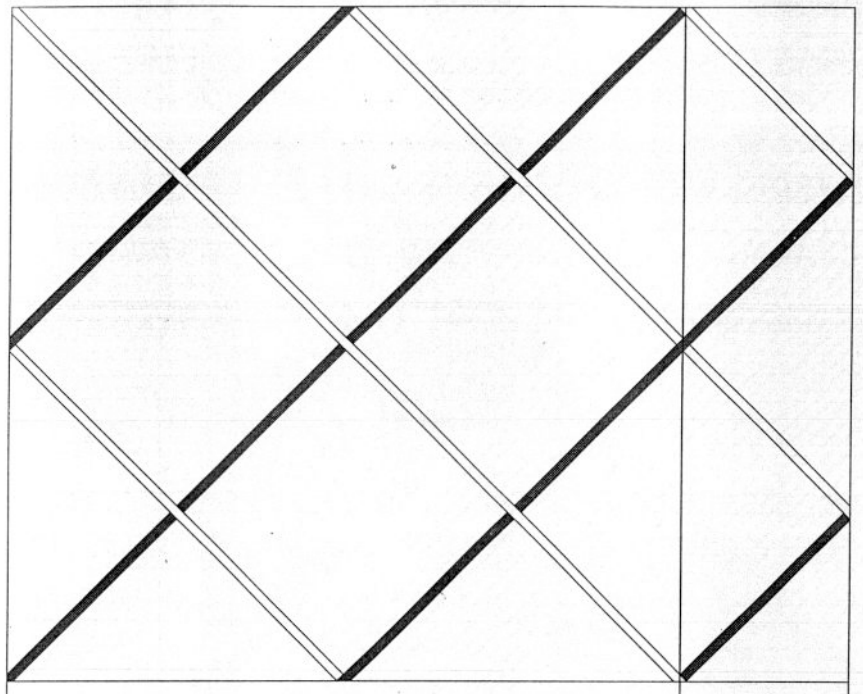
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 40/19



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

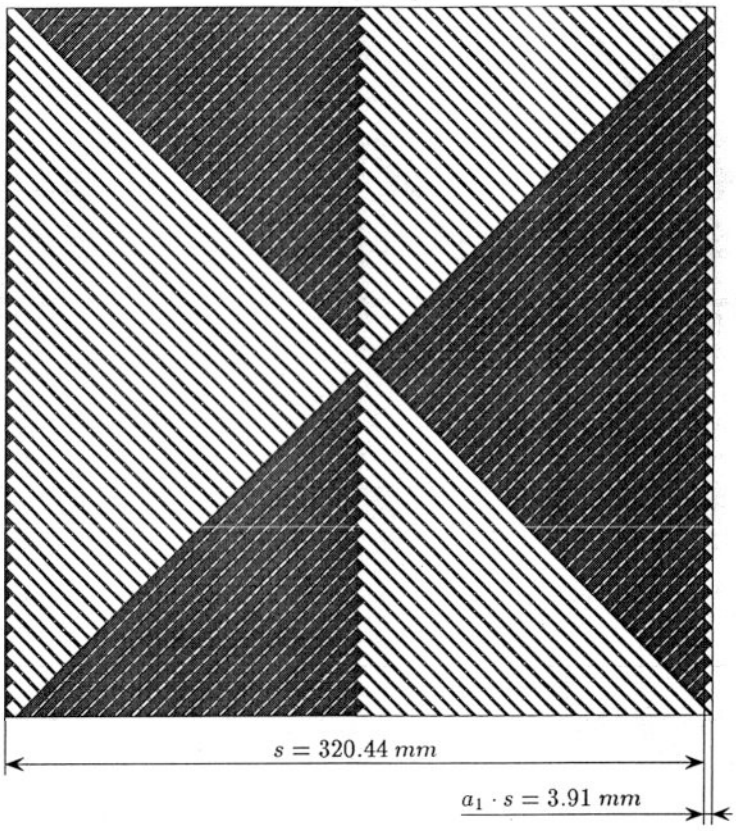
Tablica 40/20



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

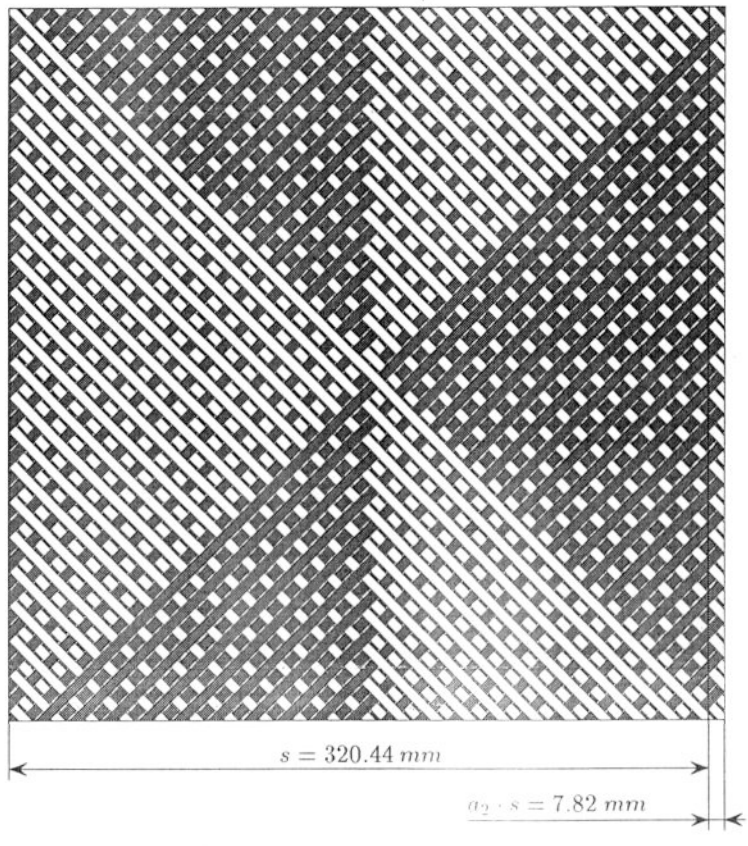
Liczba wiązek rowingu: 41																																				$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																			$= Nr/(2 \cdot 41)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	1/82
2	21	1	22	2	23	3	24	4	25	5	26	6	27	7	28	8	29	9	30	10	31	11	32	12	33	13	34	14	35	15	36	16	37	17	38	18	39	19	40	20	41	2/82
3	14	28	1	15	29	2	16	30	3	17	31	4	18	32	5	19	33	6	20	34	7	21	35	8	22	36	9	23	37	10	24	38	11	25	39	12	26	40	13	27	41	3/82
4	31	21	11	1	32	22	12	2	33	23	13	3	34	24	14	4	35	25	15	5	36	26	16	6	37	27	17	7	38	28	18	8	39	29	19	9	40	30	20	10	41	4/82
5	33	25	17	9	1	34	26	18	10	2	35	27	19	11	3	36	28	20	12	4	37	29	21	13	5	38	30	22	14	6	39	31	23	15	7	40	32	24	16	8	41	5/82
6	7	14	21	28	35	1	8	15	22	29	36	2	9	16	23	30	37	3	10	17	24	31	38	4	11	18	25	32	39	5	12	19	26	33	40	6	13	20	27	34	41	6/82
7	6	12	18	24	30	36	1	7	13	19	25	31	37	2	8	14	20	26	32	38	3	9	15	21	27	33	39	4	10	16	22	28	34	40	5	11	17	23	29	35	41	7/82
8	36	31	26	21	16	11	6	1	37	32	27	22	17	12	7	2	38	33	28	23	18	13	8	3	39	34	29	24	19	14	9	4	40	35	30	25	20	15	10	5	41	8/82
9	32	23	14	5	37	28	19	10	1	33	24	15	6	38	29	20	11	2	34	25	16	7	39	30	21	12	3	35	26	17	8	40	31	22	13	4	36	27	18	9	41	9/82
10	37	33	29	25	21	17	13	9	5	1	38	34	30	26	22	18	14	10	6	2	39	35	31	27	23	19	15	11	7	3	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	41	10/82
11	15	30	4	19	34	8	23	38	12	27	1	16	31	5	20	35	9	24	39	13	28	2	17	32	6	21	36	10	25	40	14	29	3	18	33	7	22	37	11	26	41	11/82
12	24	7	31	14	38	21	4	28	11	35	18	1	25	8	32	15	39	22	5	29	12	36	19	2	26	9	33	16	40	23	6	30	13	37	20	3	27	10	34	17	41	12/82
13	19	38	16	35	13	32	10	29	7	26	4	23	1	20	39	17	36	14	33	11	30	8	27	5	24	2	21	40	18	37	15	34	12	31	9	28	6	25	3	22	41	13/82
14	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	14/82
15	11	22	33	3	14	25	36	6	17	28	39	9	20	31	1	12	23	34	4	15	26	37	7	18	29	40	10	21	32	2	13	24	35	5	16	27	38	8	19	30	41	15/82
16	18	36	13	31	8	26	3	21	39	16	34	11	29	6	24	1	19	37	14	32	9	27	4	22	40	17	35	12	30	7	25	2	20	38	15	33	10	28	5	23	41	16/82
17	29	17	5	34	22	10	39	27	15	3	32	20	8	37	25	13	1	30	18	6	35	23	11	40	28	16	4	33	21	9	38	26	14	2	31	19	7	36	24	12	41	17/82
18	16	32	7	23	39	14	30	5	21	37	12	28	3	19	35	10	26	1	17	33	8	24	40	15	31	6	22	38	13	29	4	20	36	11	27	2	18	34	9	25	41	18/82
19	13	26	39	11	24	37	9	22	35	7	20	33	5	18	31	3	16	29	1	14	27	40	12	25	38	10	23	36	8	21	34	6	19	32	4	17	30	2	15	28	41	19/82
20	39	37	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	40	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	41	20/82

Tablica 41/1



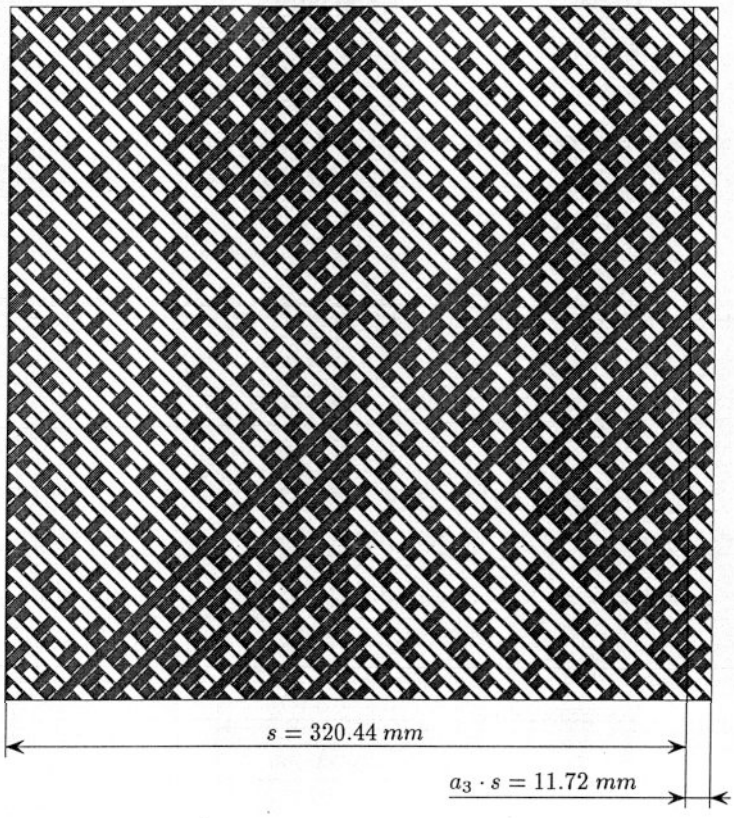
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/2



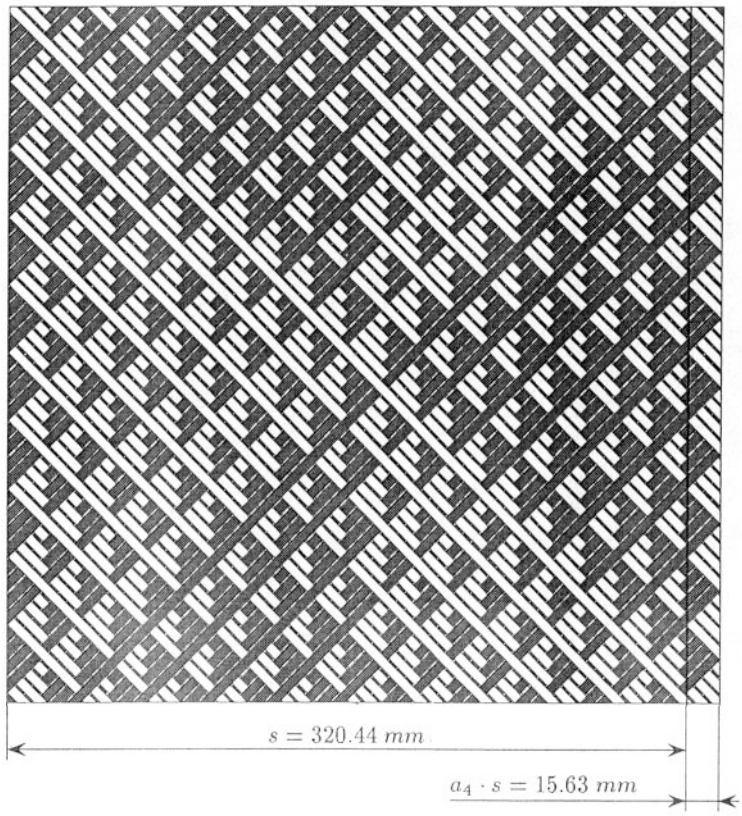
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/3



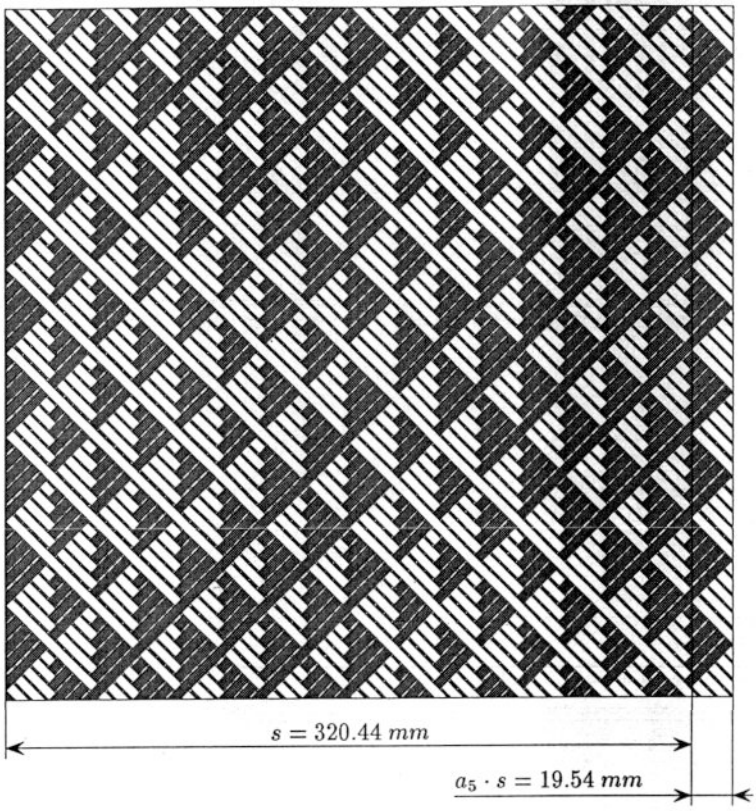
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/4



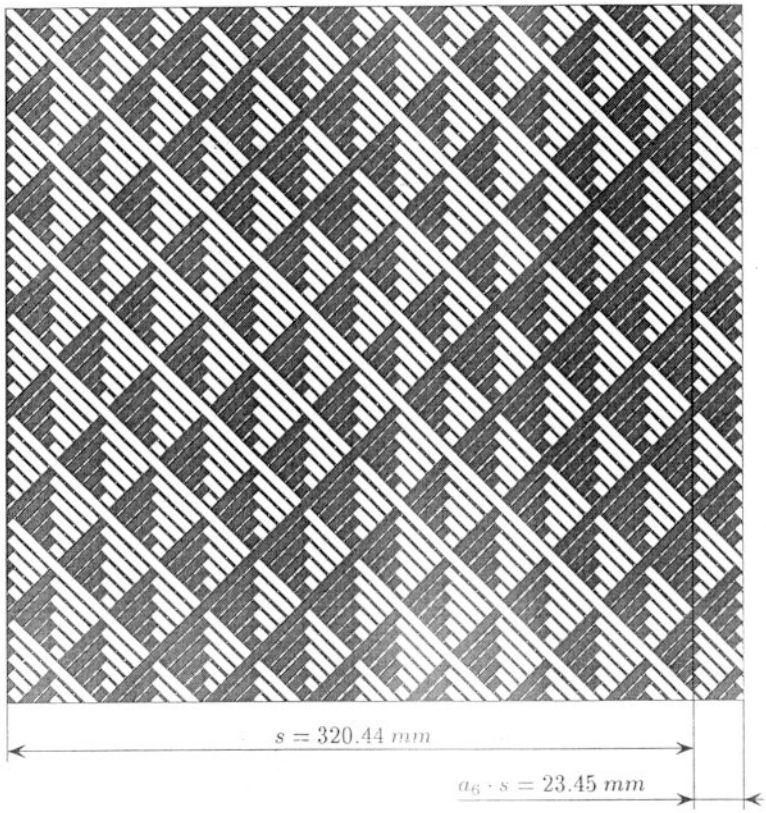
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/5



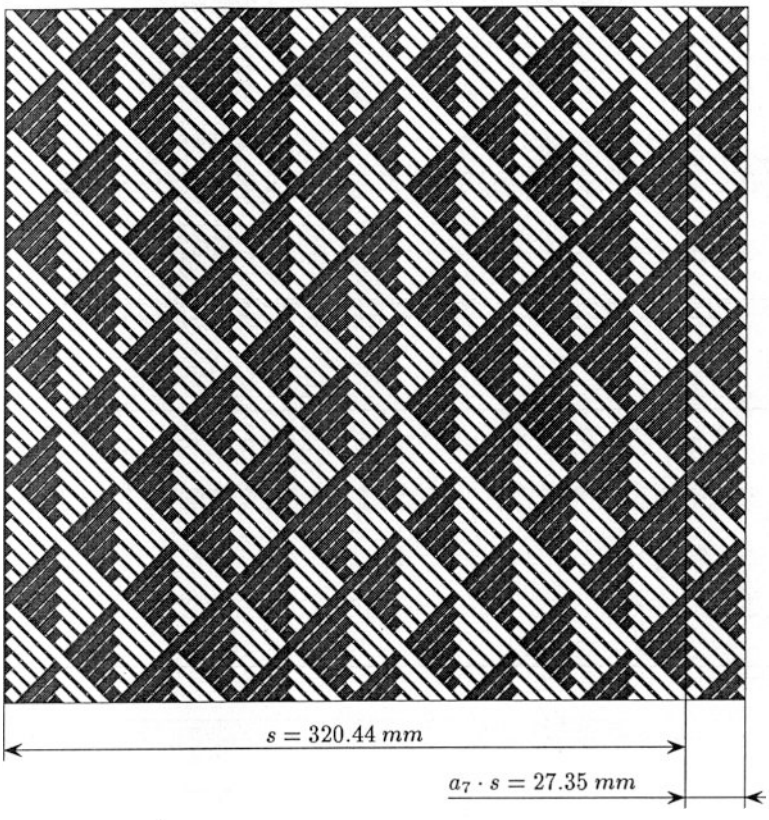
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 41/6



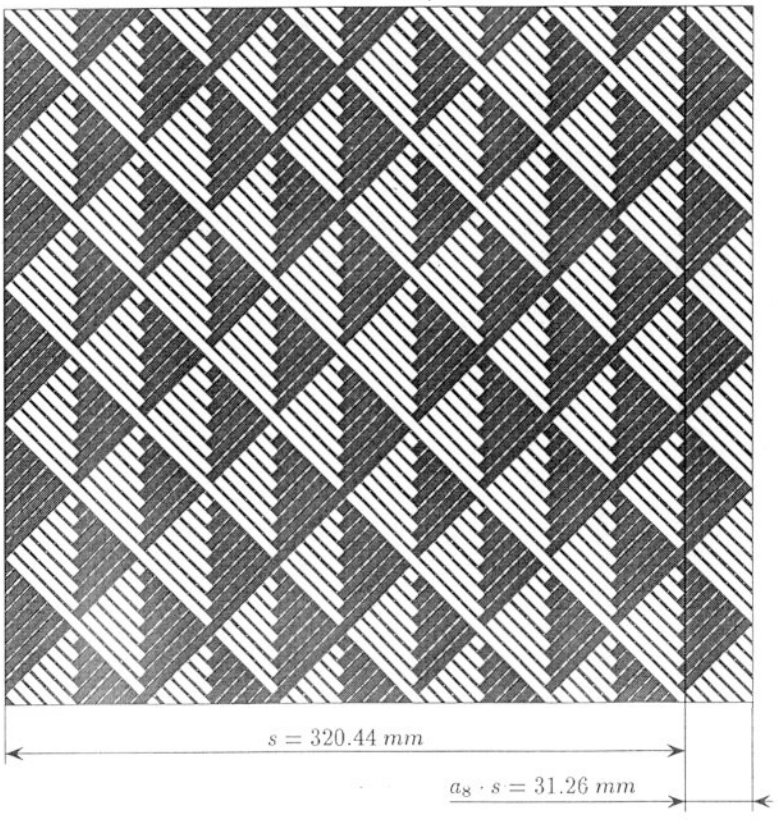
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 41/7



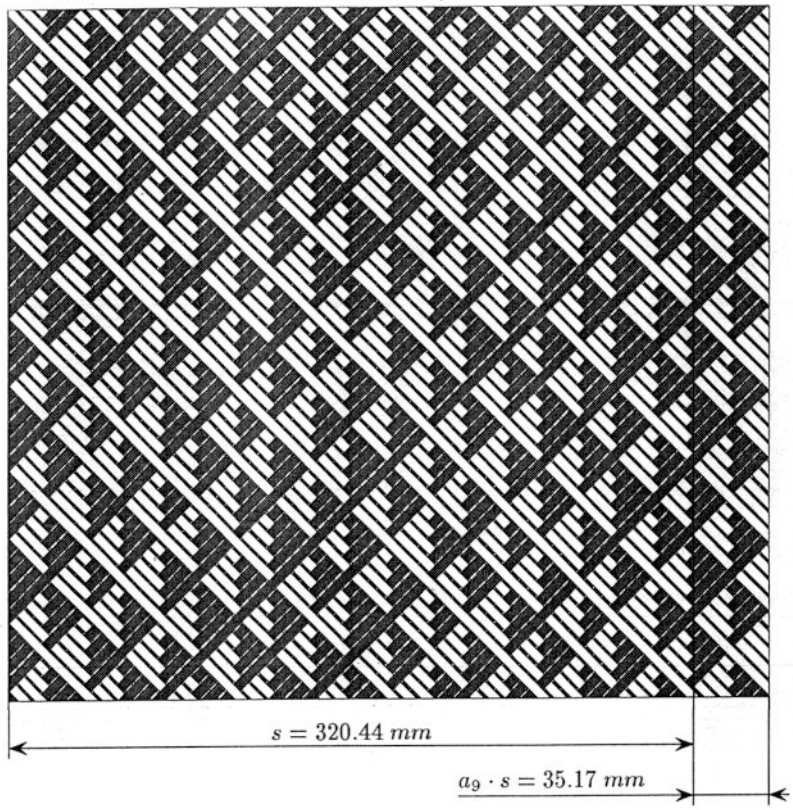
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/8



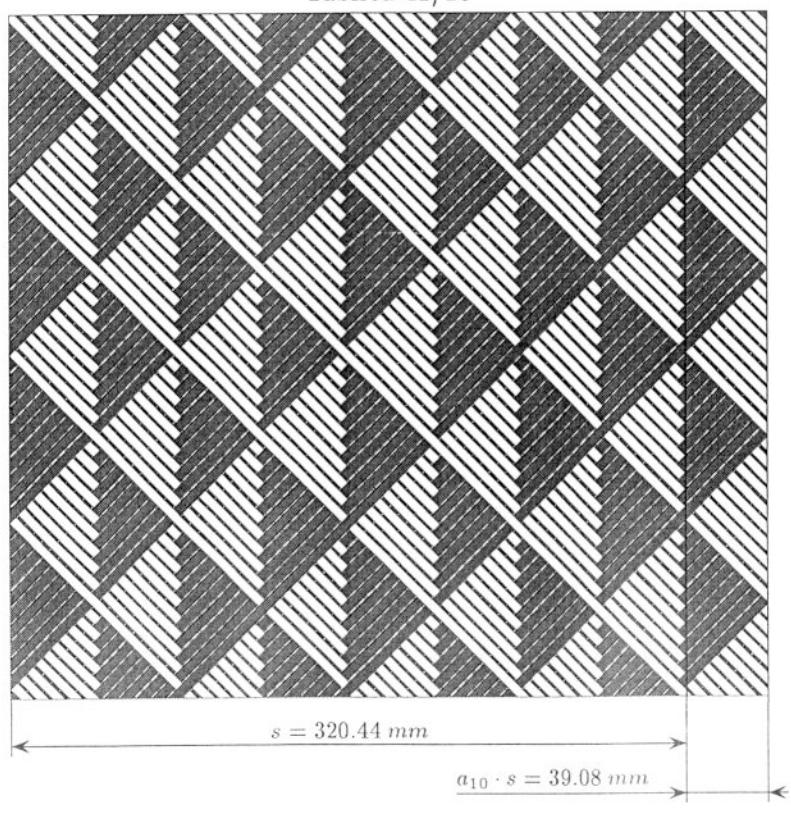
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/9



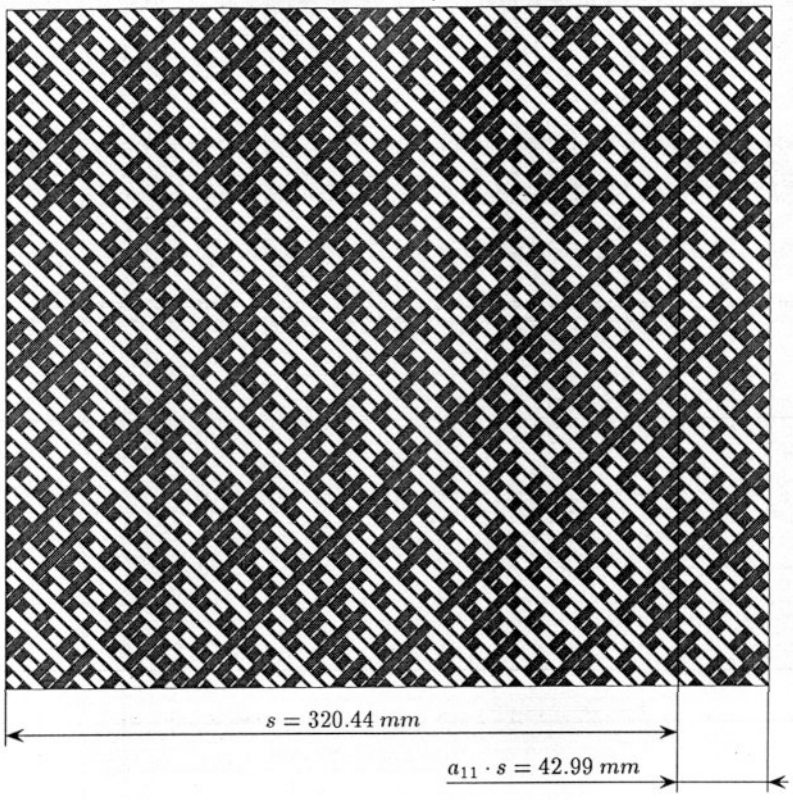
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/10



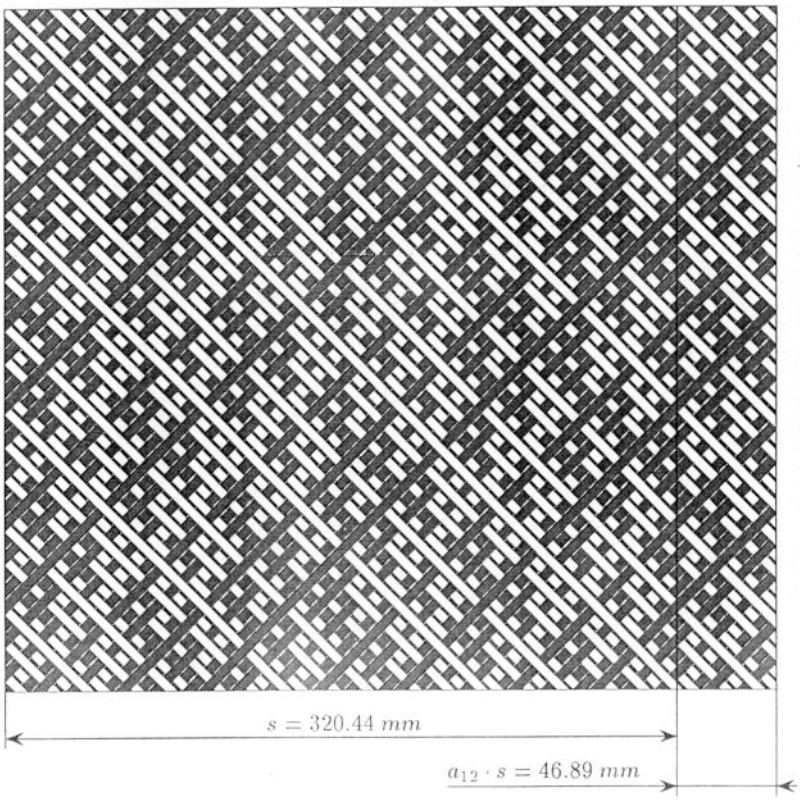
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/11



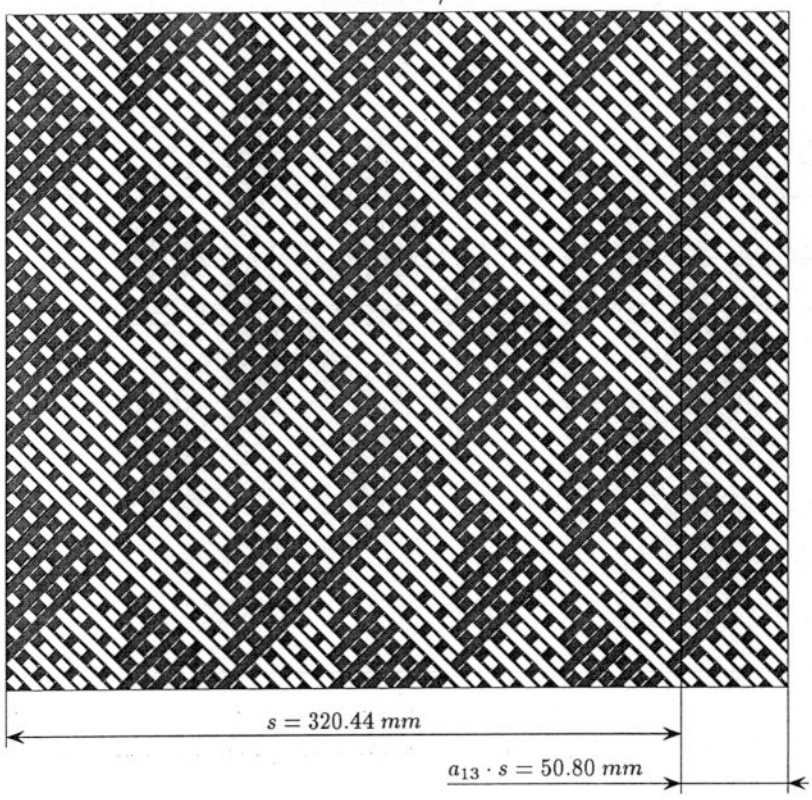
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/12



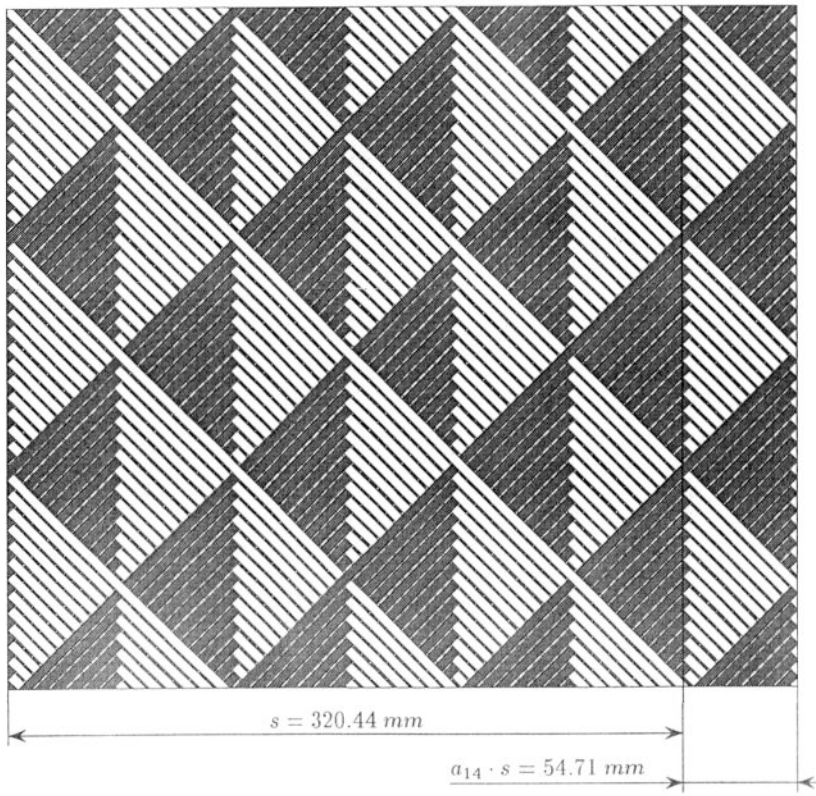
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/13



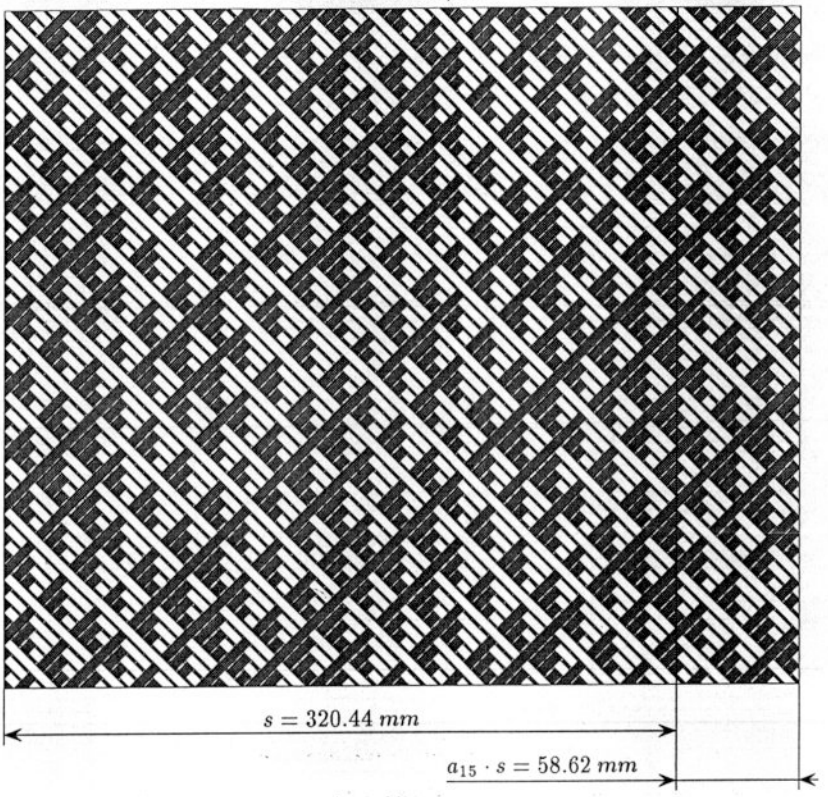
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/14



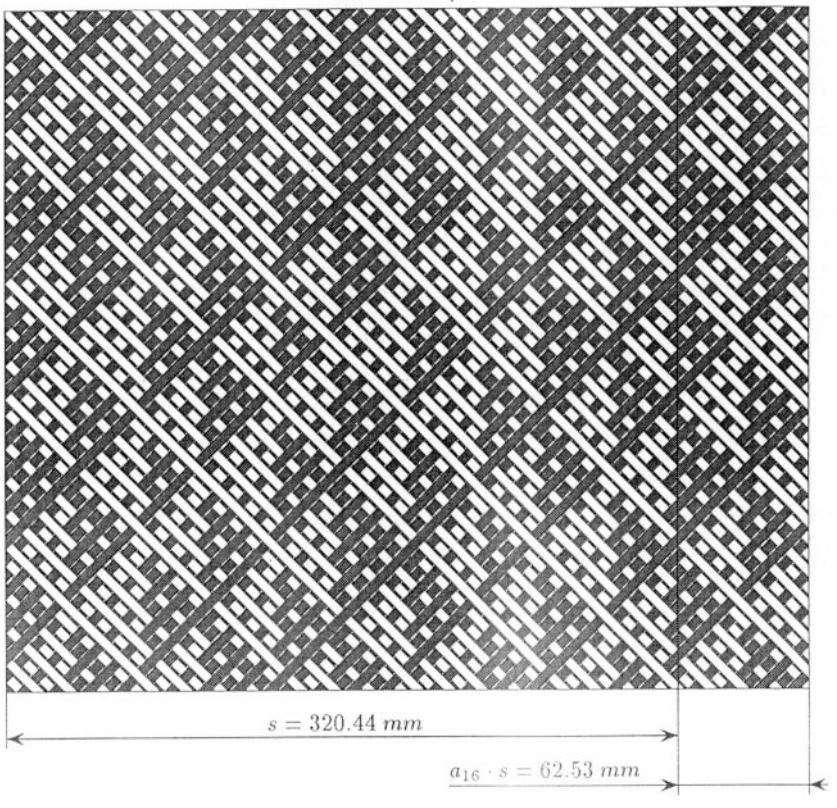
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/15



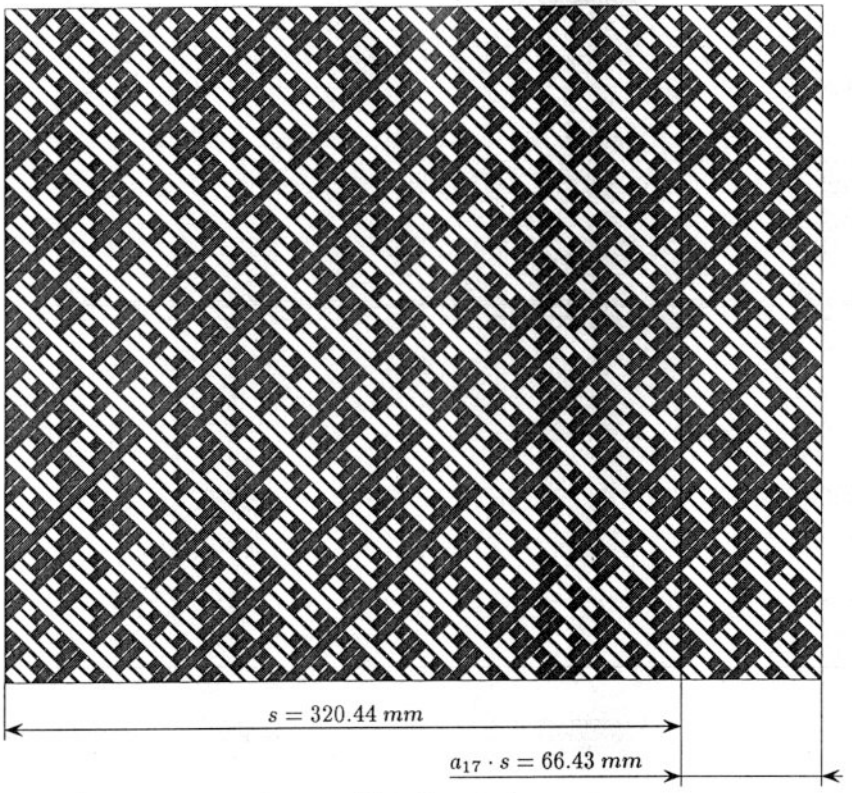
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/16



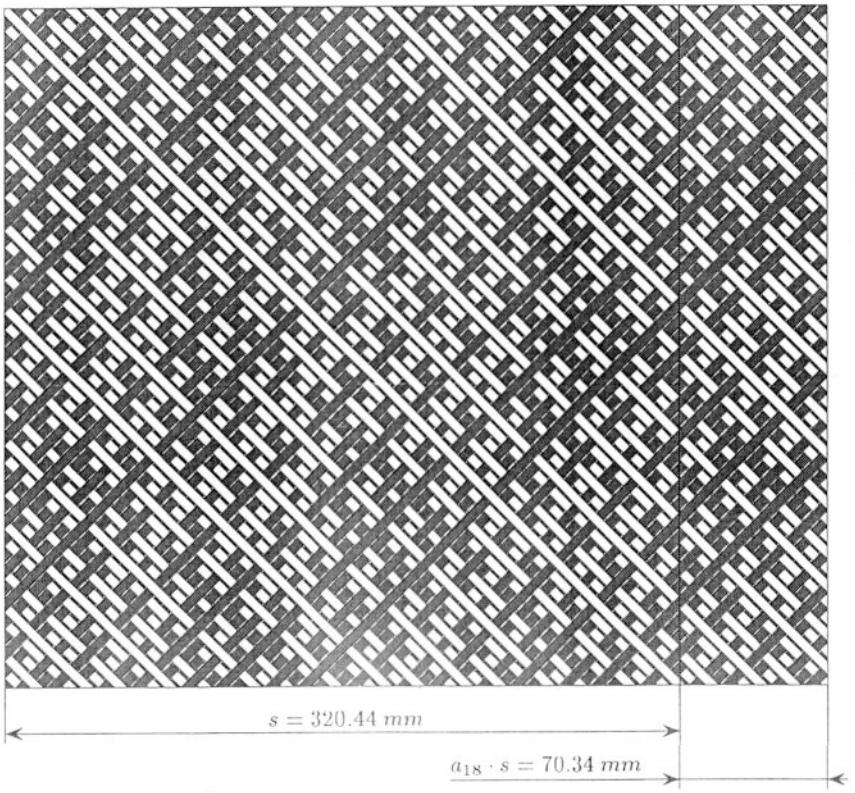
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/17



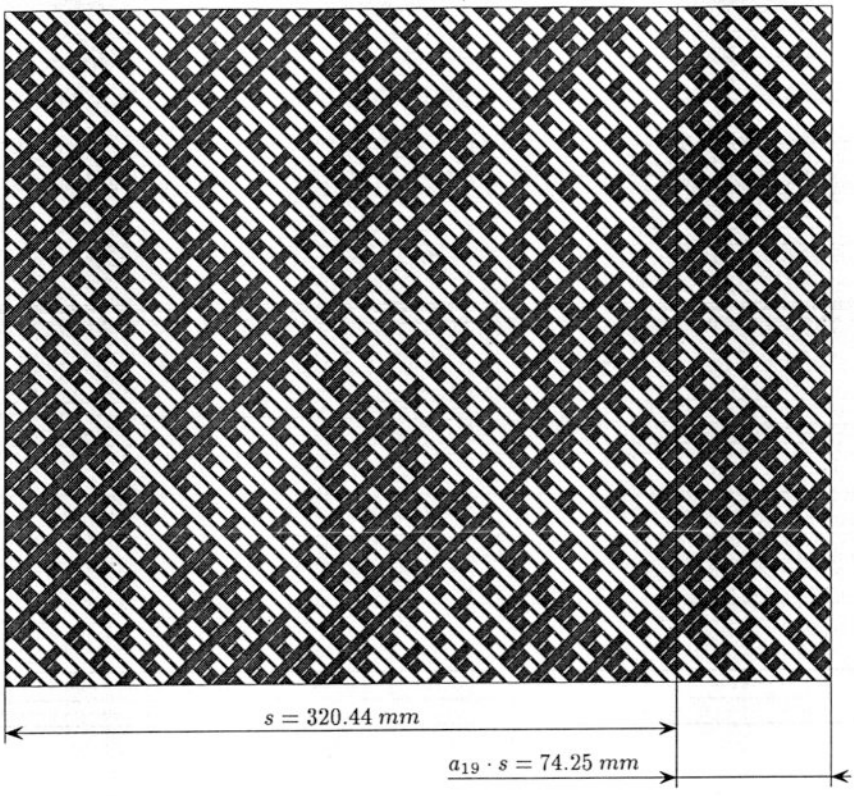
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/18



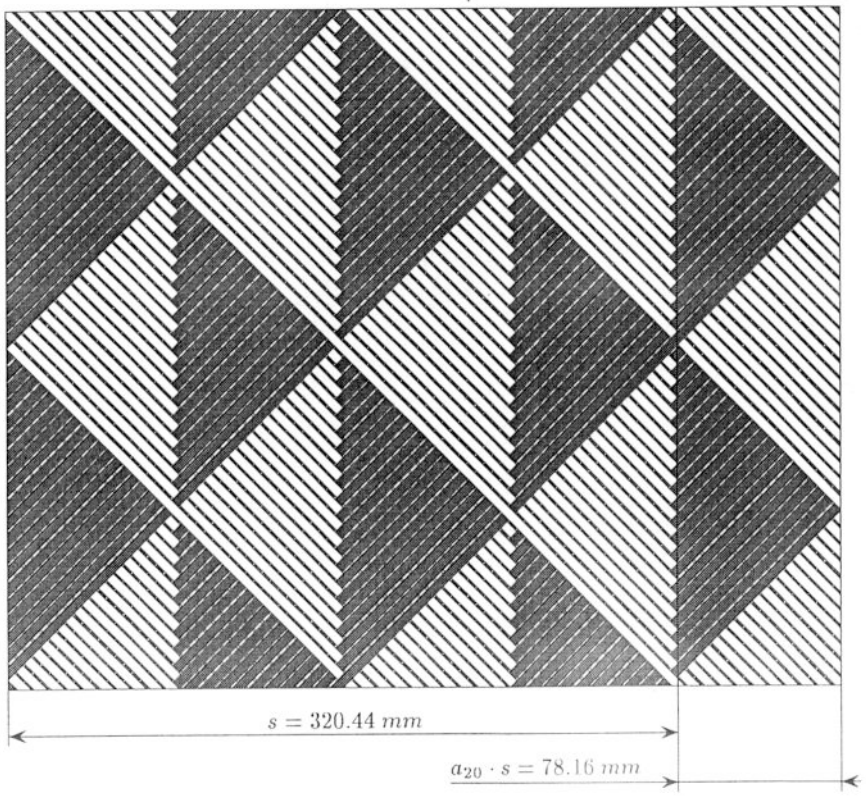
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 41/19



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

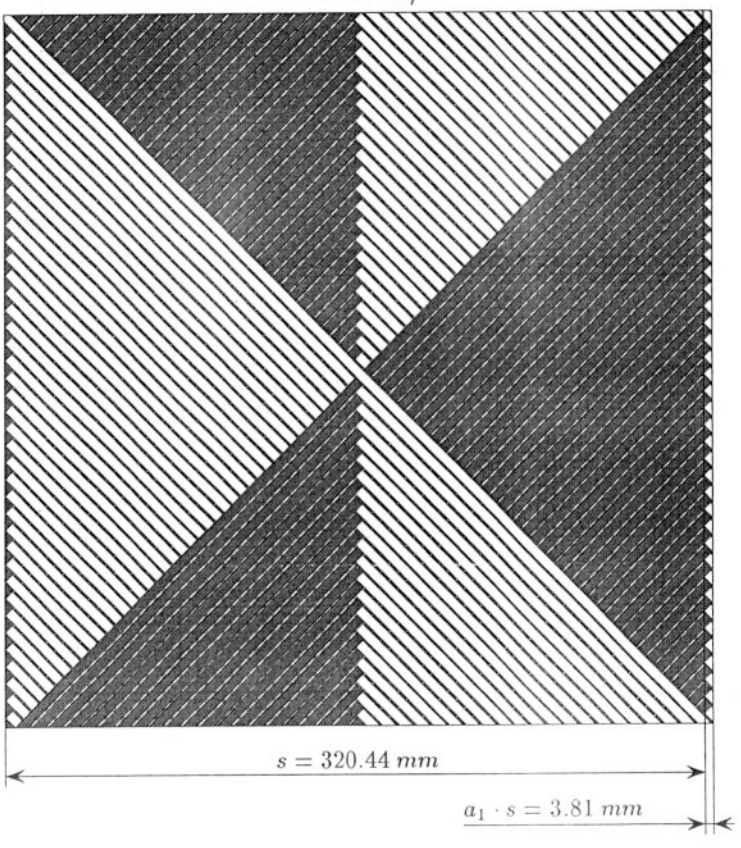
Tablica 41/20



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

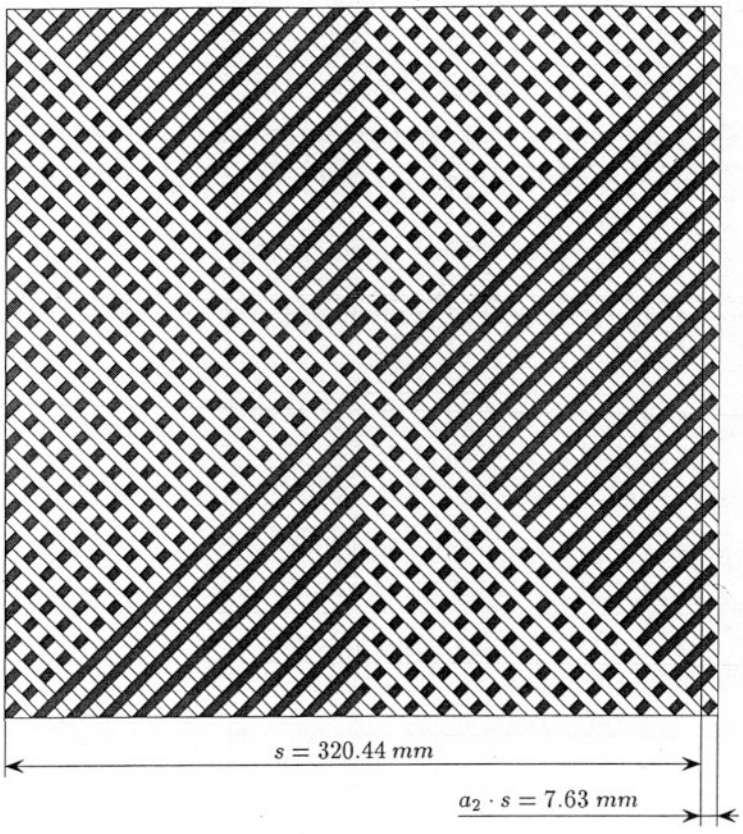
Liczba wiązek rowingu: 42																																										$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																										$= Nr/(2 \cdot 42)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	1/84
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	0	16	0	17	0	18	0	19	0	20	0	21	2/84
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	0	0	9	0	0	10	0	0	11	0	0	12	0	0	13	0	0	14	3/84
4	0	11	0	1	0	12	0	2	0	13	0	3	0	14	0	4	0	15	0	5	0	16	0	6	0	17	0	7	0	18	0	8	0	19	0	9	0	20	0	10	0	21	4/84
5	17	34	9	26	1	18	35	10	27	2	19	36	11	28	3	20	37	12	29	4	21	38	13	30	5	22	39	14	31	6	23	40	15	32	7	24	41	16	33	8	25	42	5/84
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	7	6/84
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	6	7/84
8	0	16	0	11	0	6	0	1	0	17	0	12	0	7	0	2	0	18	0	13	0	8	0	3	0	19	0	14	0	9	0	4	0	20	0	15	0	10	0	5	0	21	8/84
9	0	0	5	0	0	10	0	0	1	0	0	6	0	0	11	0	0	2	0	0	7	0	0	12	0	0	3	0	0	8	0	0	13	0	0	4	0	0	9	0	0	14	9/84
10	0	17	0	13	0	9	0	5	0	1	0	18	0	14	0	10	0	6	0	2	0	19	0	15	0	11	0	7	0	3	0	20	0	16	0	12	0	8	0	4	0	21	10/84
11	23	4	27	8	31	12	35	16	39	20	1	24	5	28	9	32	13	36	17	40	21	2	25	6	29	10	33	14	37	18	41	22	3	26	7	30	11	34	15	38	19	42	11/84
12	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	7	12/84
13	13	26	39	10	23	36	7	20	33	4	17	30	1	14	27	40	11	24	37	8	21	34	5	18	31	2	15	28	41	12	25	38	9	22	35	6	19	32	3	16	29	42	13/84
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	14/84
15	0	0	3	0	0	6	0	0	9	0	0	12	0	0	1	0	0	4	0	0	7	0	0	10	0	0	13	0	0	2	0	0	5	0	0	8	0	0	11	0	0	14	15/84
16	0	8	0	16	0	3	0	11	0	19	0	6	0	14	0	1	0	9	0	17	0	4	0	12	0	20	0	7	0	15	0	2	0	10	0	18	0	5	0	13	0	21	16/84
17	5	10	15	20	25	30	35	40	3	8	13	18	23	28	33	38	1	6	11	16	21	26	31	36	41	4	9	14	19	24	29	34	39	2	7	12	17	22	27	32	37	42	17/84
18	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	7	18/84
19	31	20	9	40	29	18	7	38	27	16	5	36	25	14	3	34	23	12	1	32	21	10	41	30	19	8	39	28	17	6	37	26	15	4	35	24	13	2	33	22	11	42	19/84
20	0	19	0	17	0	15	0	13	0	11	0	9	0	7	0	5	0	3	0	1	0	20	0	18	0	16	0	14	0	12	0	10	0	8	0	6	0	4	0	2	0	21	20/84
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	21/84

Tablica 42/1



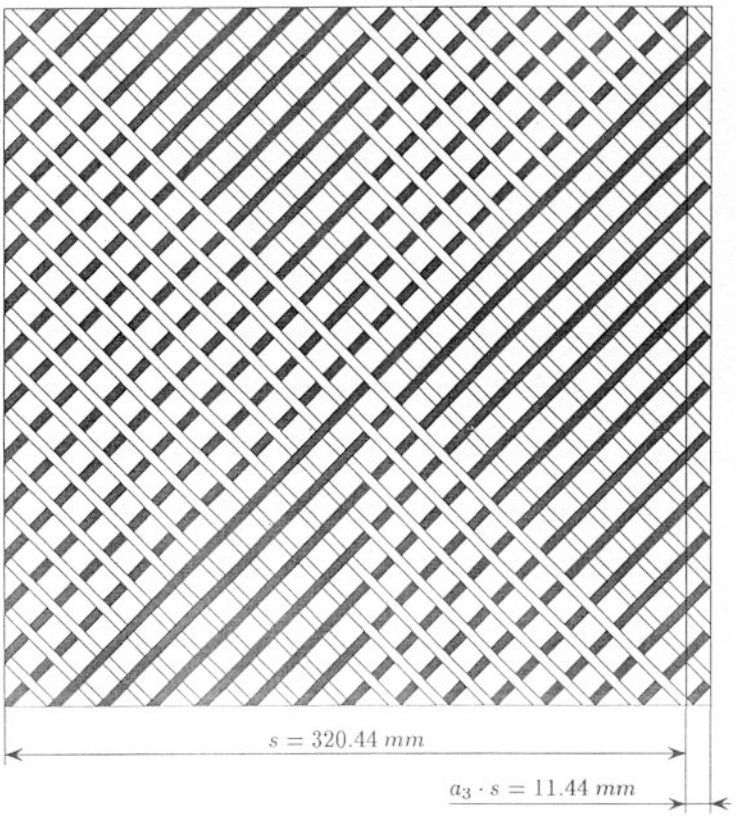
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/2



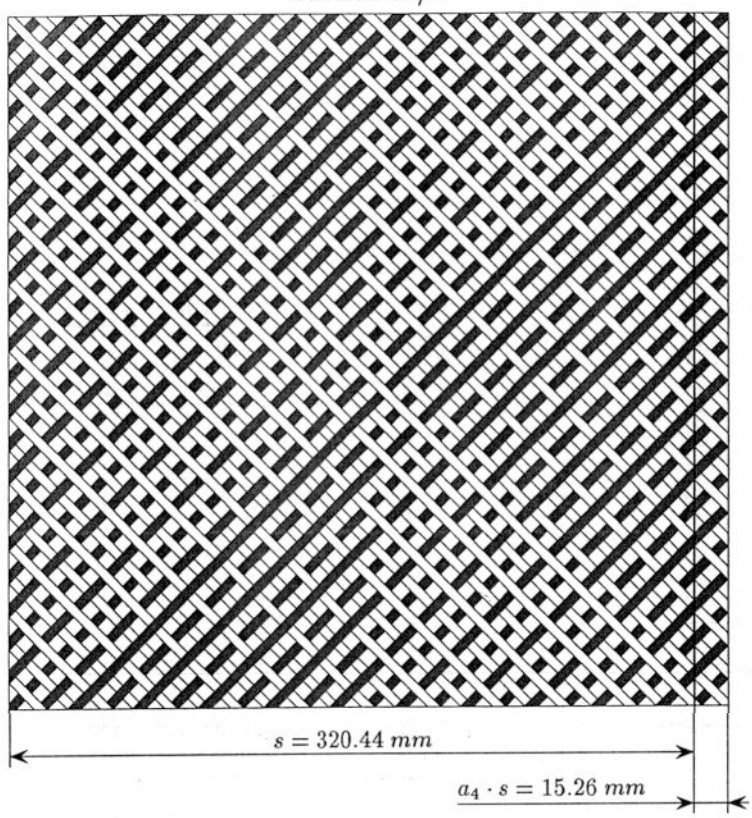
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/3



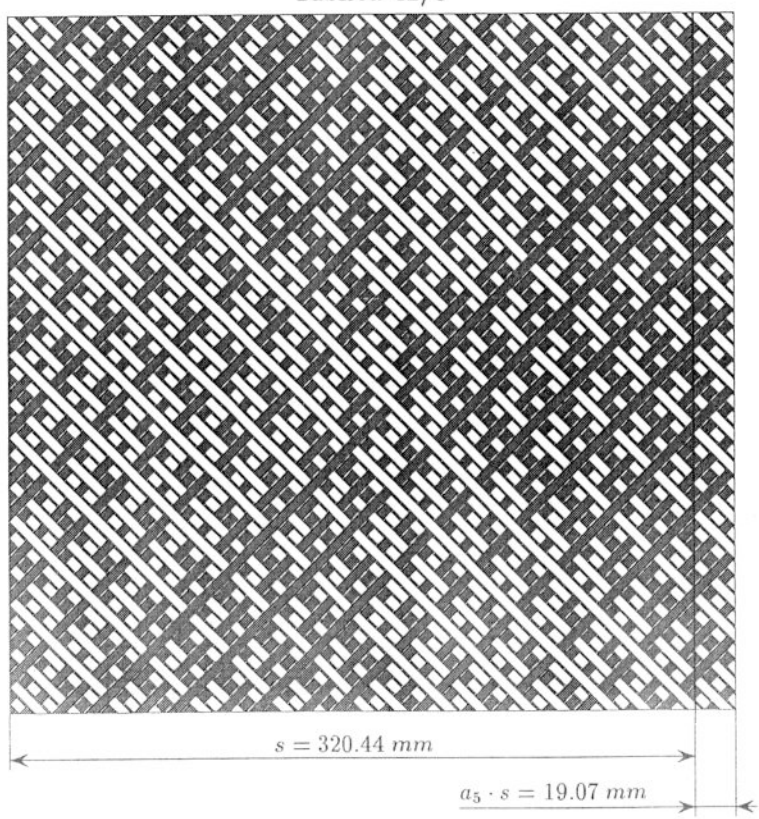
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/4



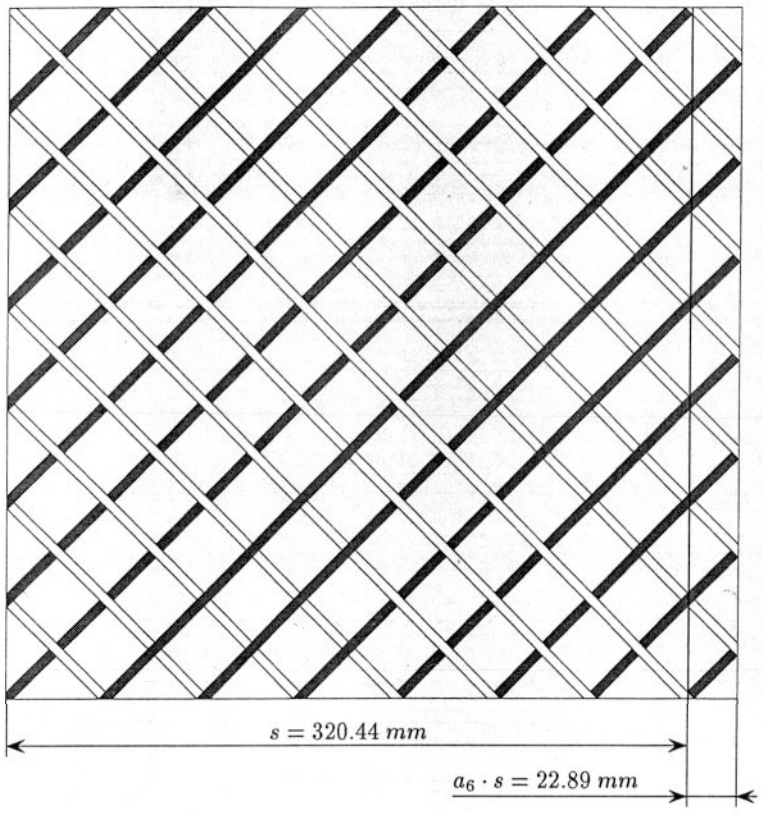
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/5



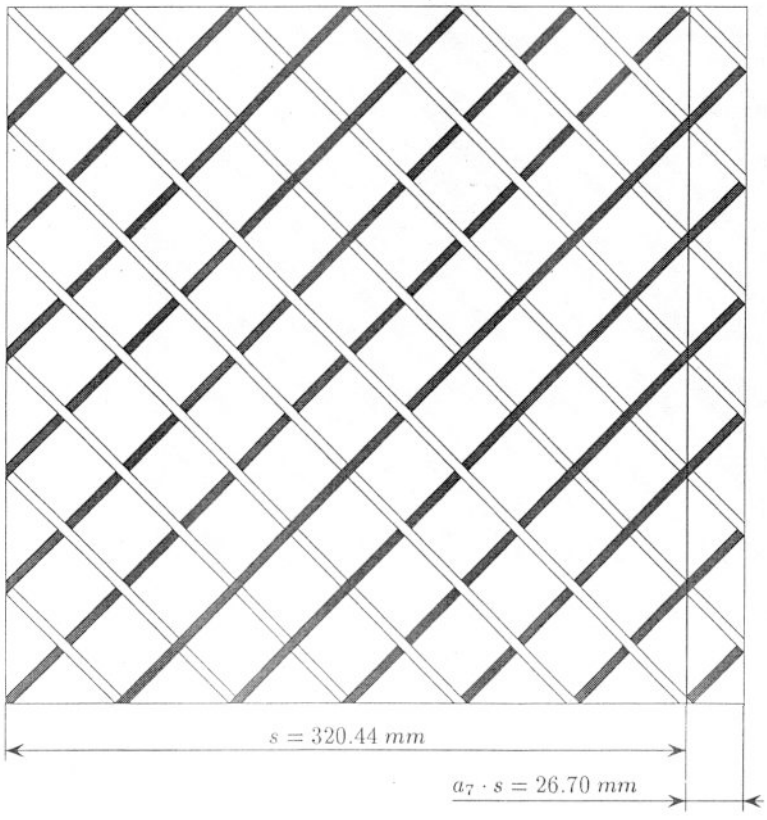
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/6



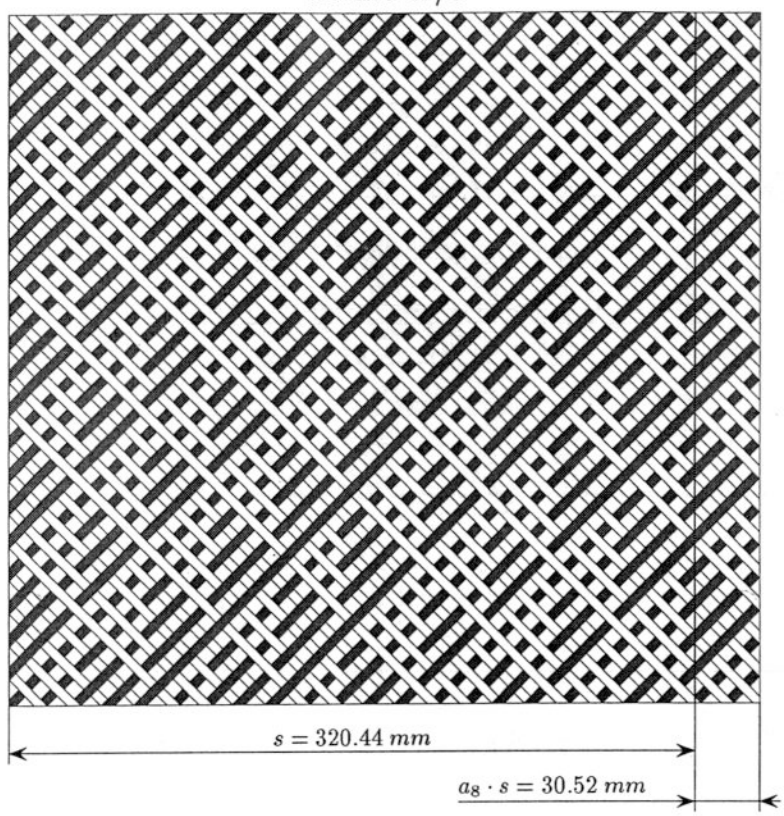
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/7



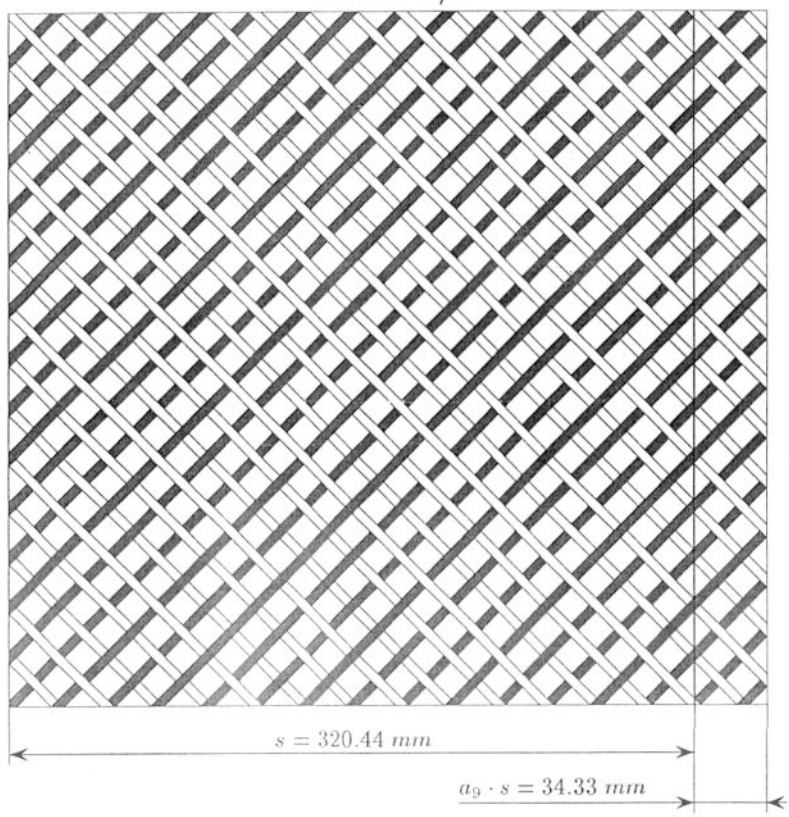
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/8



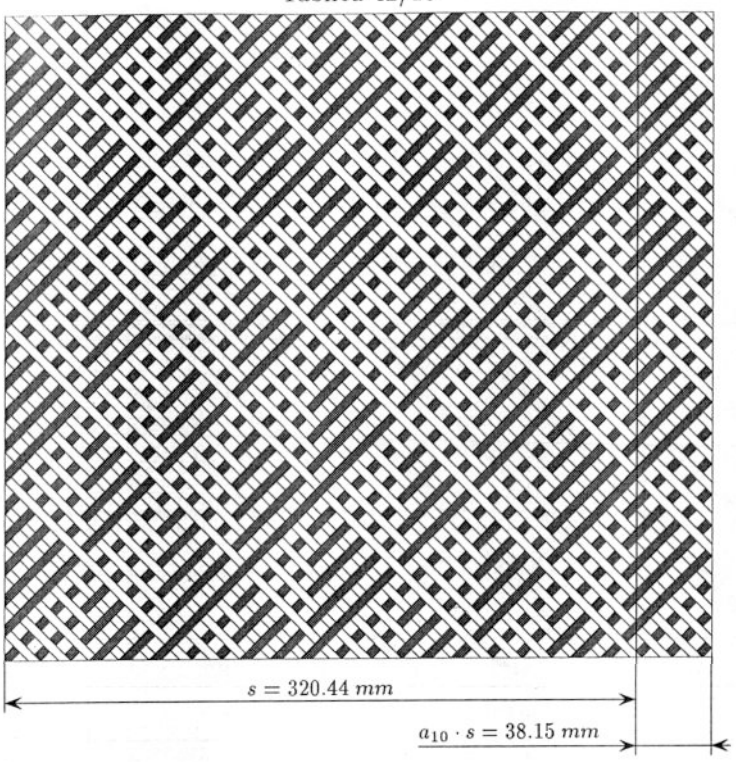
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/9



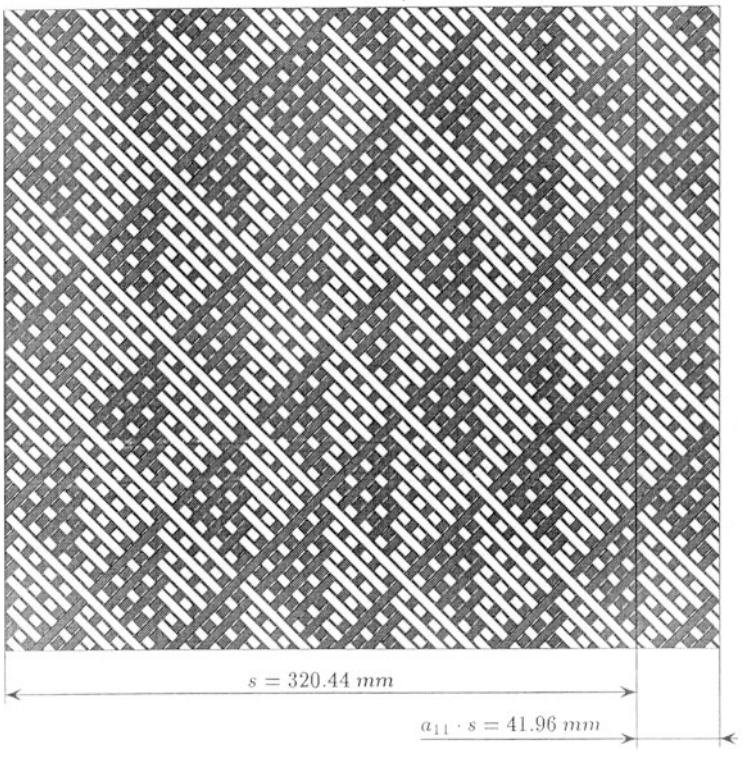
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/10



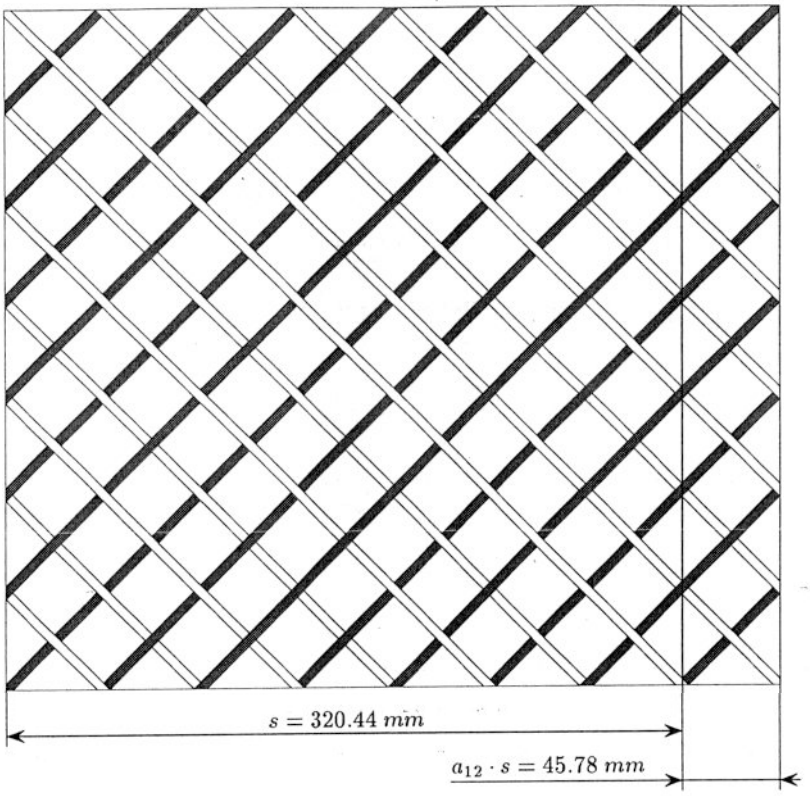
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/11



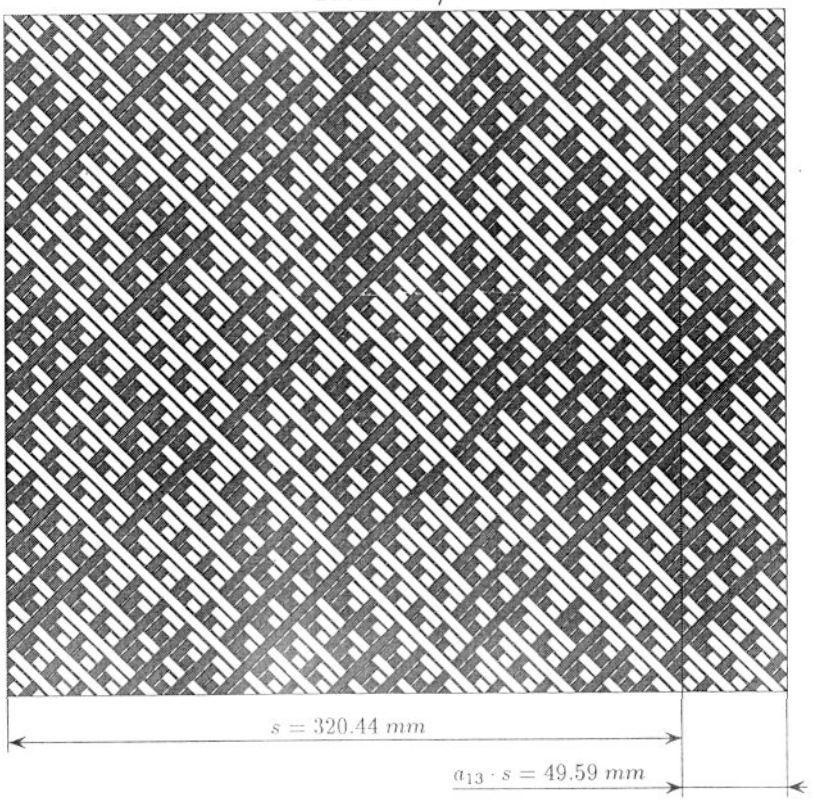
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/12



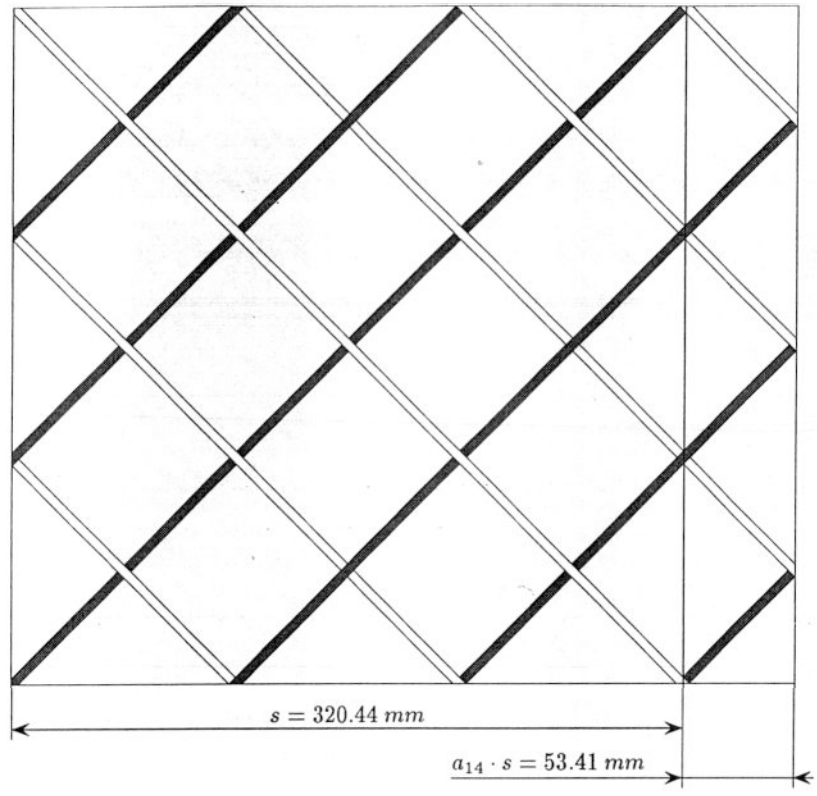
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/13



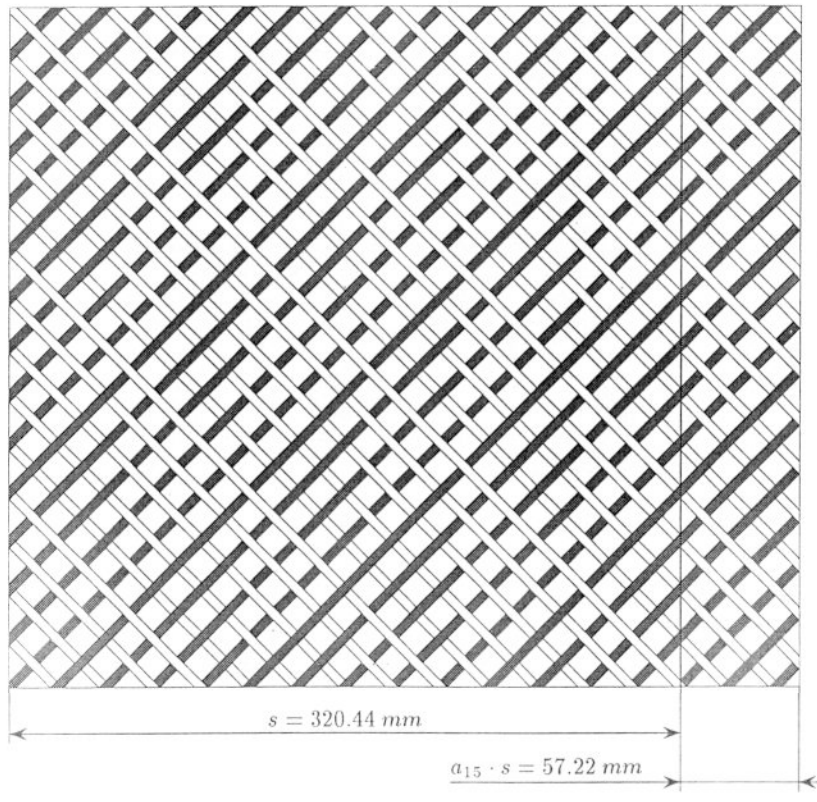
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/14



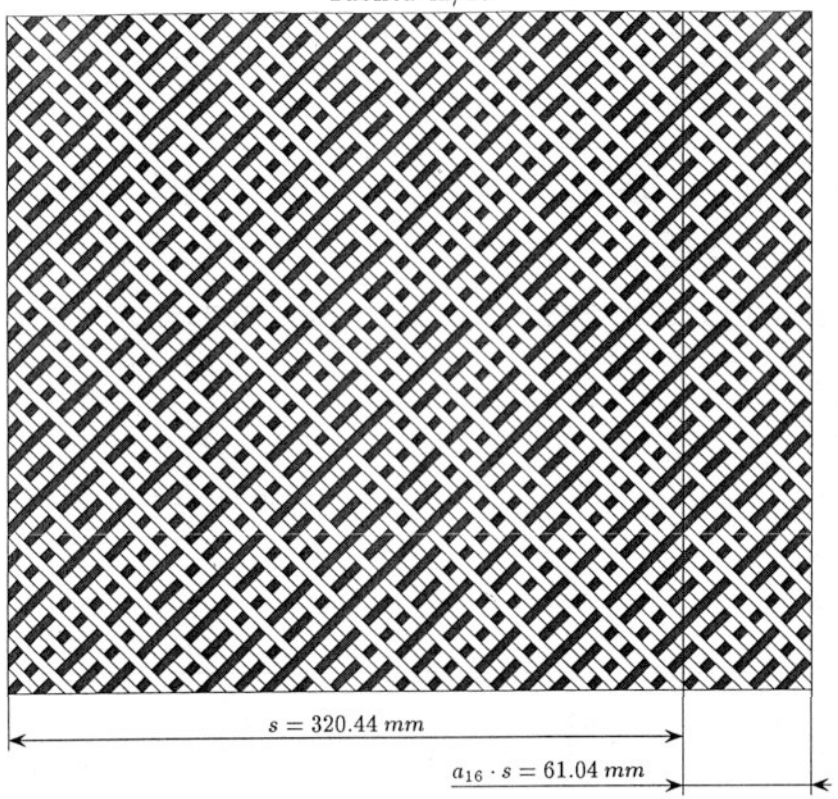
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/15



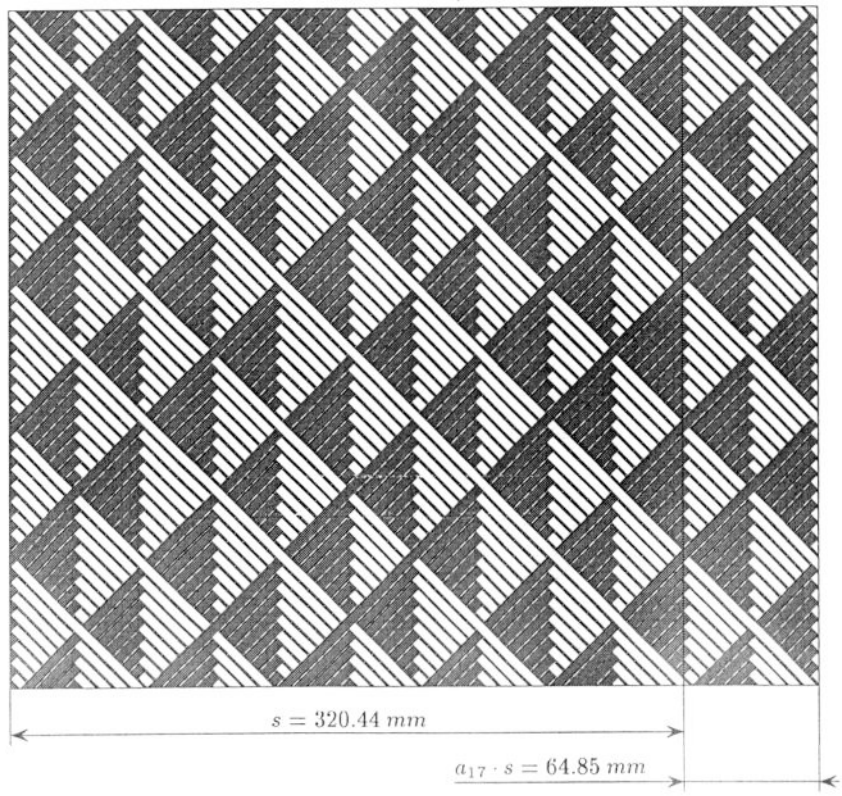
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/16



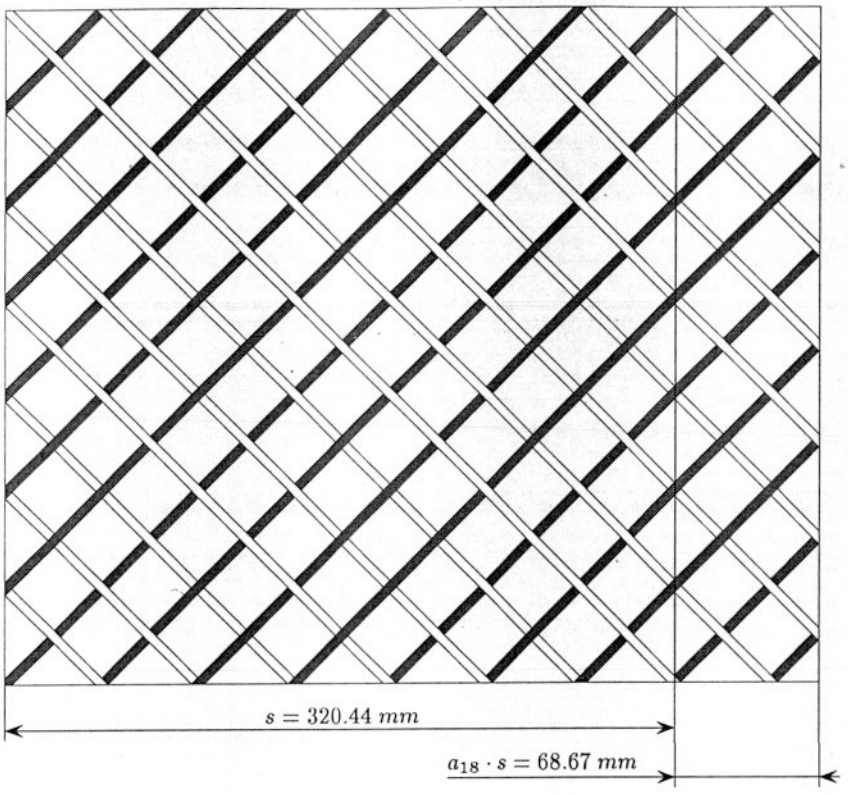
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/17



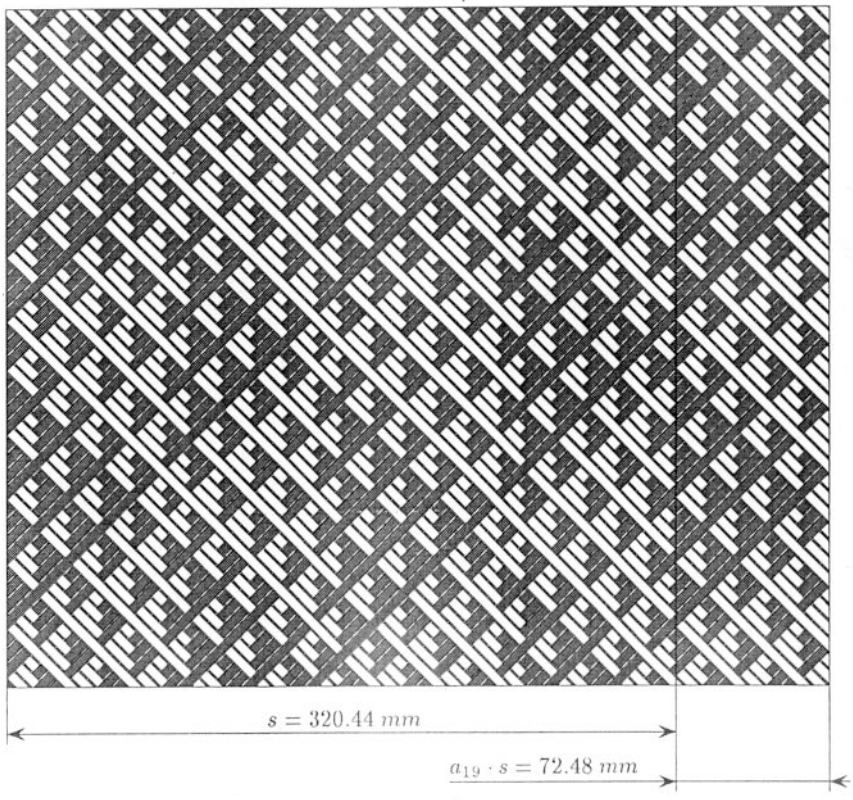
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/18



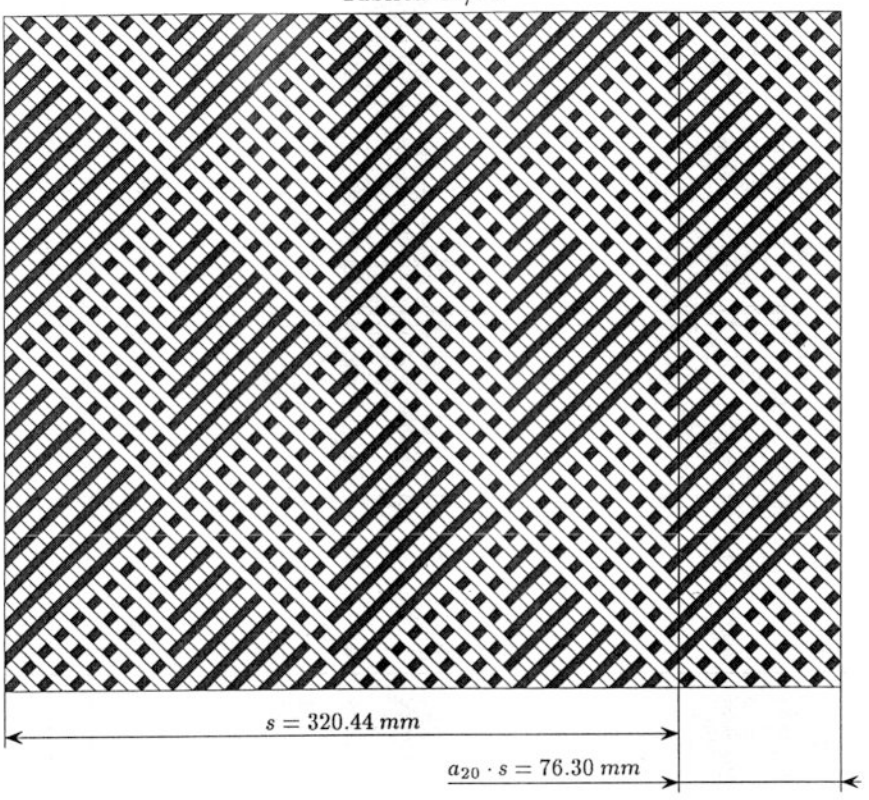
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/19



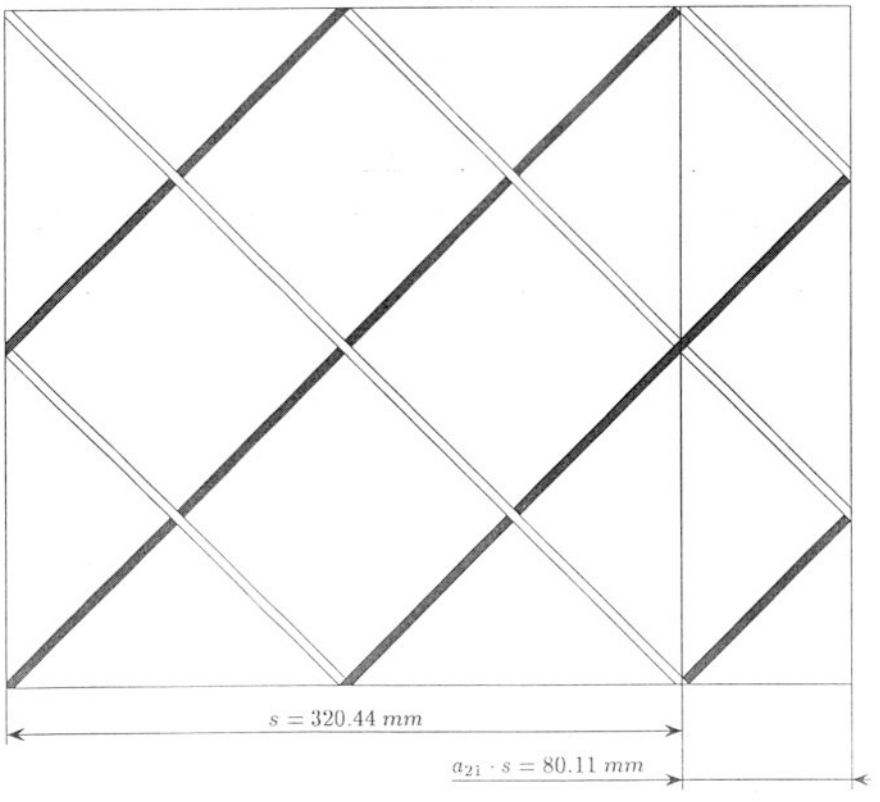
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 42/20



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

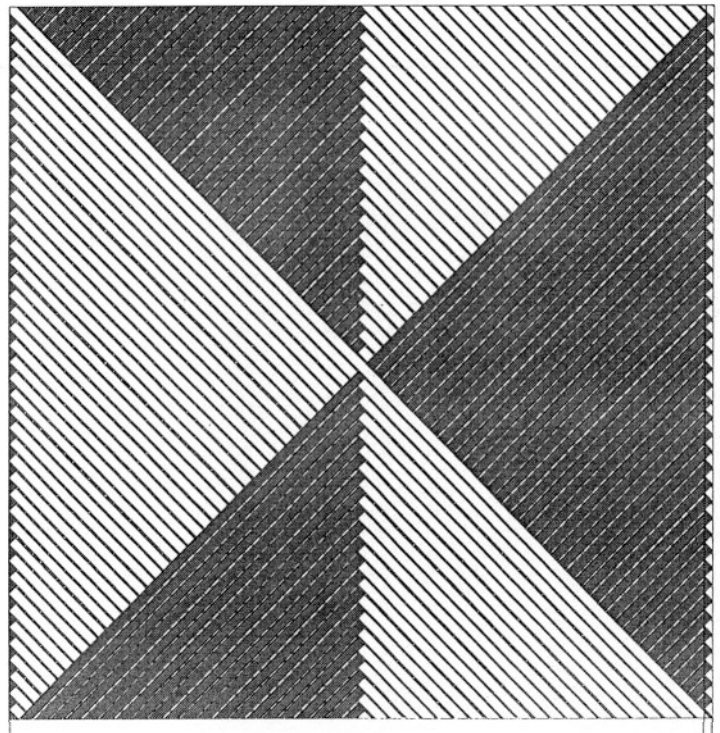
Tablica 42/21



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

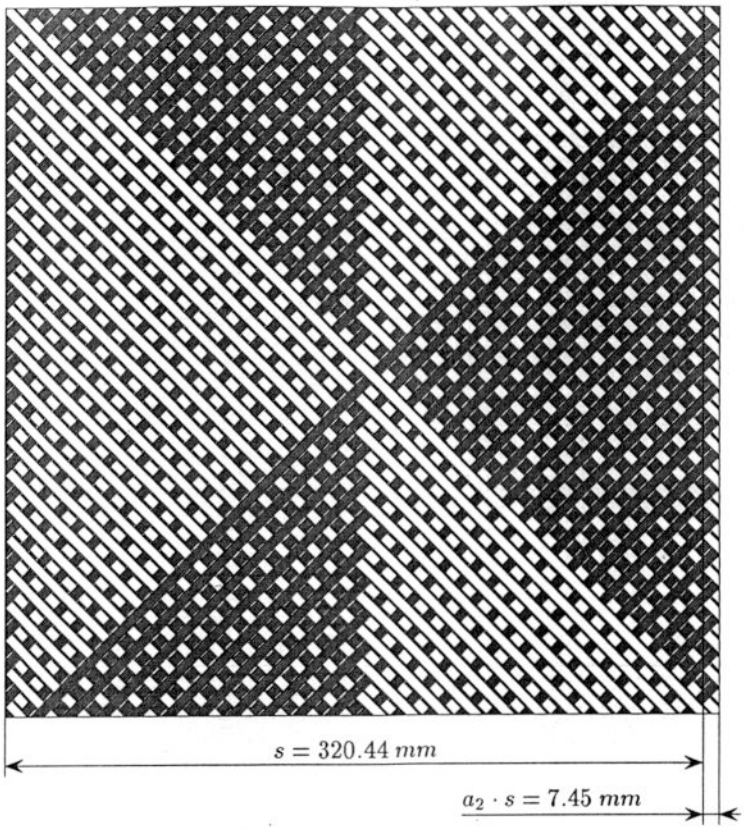
Liczba wiązek rowingu: **43**																																									$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																									$= Nr/(2 \cdot 43)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	1/86
2	22	1	23	2	24	3	25	4	26	5	27	6	28	7	29	8	30	9	31	10	32	11	33	12	34	13	35	14	36	15	37	16	38	17	39	18	40	19	41	20	42	21	43	2/86
3	29	15	1	30	16	2	31	17	3	32	18	4	33	19	5	34	20	6	35	21	7	36	22	8	37	23	9	38	24	10	39	25	11	40	26	12	41	27	13	42	28	14	43	3/86
4	11	22	33	1	12	23	34	2	13	24	35	3	14	25	36	4	15	26	37	5	16	27	38	6	17	28	39	7	18	29	40	8	19	30	41	9	20	31	42	10	21	32	43	4/86
5	26	9	35	18	1	27	10	36	19	2	28	11	37	20	3	29	12	38	21	4	30	13	39	22	5	31	14	40	23	6	32	15	41	24	7	33	16	42	25	8	34	17	43	5/86
6	36	29	22	15	8	1	37	30	23	16	9	2	38	31	24	17	10	3	39	32	25	18	11	4	40	33	26	19	12	5	41	34	27	20	13	6	42	35	28	21	14	7	43	6/86
7	37	31	25	19	13	7	1	38	32	26	20	14	8	2	39	33	27	21	15	9	3	40	34	28	22	16	10	4	41	35	29	23	17	11	5	42	36	30	24	18	12	6	43	7/86
8	27	11	38	22	6	33	17	1	28	12	39	23	7	34	18	2	29	13	40	24	8	35	19	3	30	14	41	25	9	36	20	4	31	15	42	26	10	37	21	5	32	16	43	8/86
9	24	5	29	10	34	15	39	20	1	25	6	30	11	35	16	40	21	2	26	7	31	12	36	17	41	22	3	27	8	32	13	37	18	42	23	4	28	9	33	14	38	19	43	9/86
10	13	26	39	9	22	35	5	18	31	1	14	27	40	10	23	36	6	19	32	2	15	28	41	11	24	37	7	20	33	3	16	29	42	12	25	38	8	21	34	4	17	30	43	10/86
11	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42	3	7	11	15	19	23	27	31	35	39	43	11/86
12	18	36	11	29	4	22	40	15	33	8	26	1	19	37	12	30	5	23	41	16	34	9	27	2	20	38	13	31	6	24	42	17	35	10	28	3	21	39	14	32	7	25	43	12/86
13	10	20	30	40	7	17	27	37	4	14	24	34	1	11	21	31	41	8	18	28	38	5	15	25	35	2	12	22	32	42	9	19	29	39	6	16	26	36	3	13	23	33	43	13/86
14	40	37	34	31	28	25	22	19	16	13	10	7	4	1	41	38	35	32	29	26	23	20	17	14	11	8	5	2	42	39	36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	43	14/86
15	23	3	26	6	29	9	32	12	35	15	38	18	41	21	1	24	4	27	7	30	10	33	13	36	16	39	19	42	22	2	25	5	28	8	31	11	34	14	37	17	40	20	43	15/86
16	35	27	19	11	3	38	30	22	14	6	41	33	25	17	9	1	36	28	20	12	4	39	31	23	15	7	42	34	26	18	10	2	37	29	21	13	5	40	32	24	16	8	43	16/86
17	38	33	28	23	18	13	8	3	41	36	31	26	21	16	11	6	1	39	34	29	24	19	14	9	4	42	37	32	27	22	17	12	7	2	40	35	30	25	20	15	10	5	43	17/86
18	12	24	36	5	17	29	41	10	22	34	3	15	27	39	8	20	32	1	13	25	37	6	18	30	42	11	23	35	4	16	28	40	9	21	33	2	14	26	38	7	19	31	43	18/86
19	34	25	16	7	41	32	23	14	5	39	30	21	12	3	37	28	19	10	1	35	26	17	8	42	33	24	15	6	40	31	22	13	4	38	29	20	11	2	36	27	18	9	43	19/86
20	28	13	41	26	11	39	24	9	37	22	7	35	20	5	33	18	3	31	16	1	29	14	42	27	12	40	25	10	38	23	8	36	21	6	34	19	4	32	17	2	30	15	43	20/86
21	41	39	37	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	42	40	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	43	21/86

Tablica 43/1



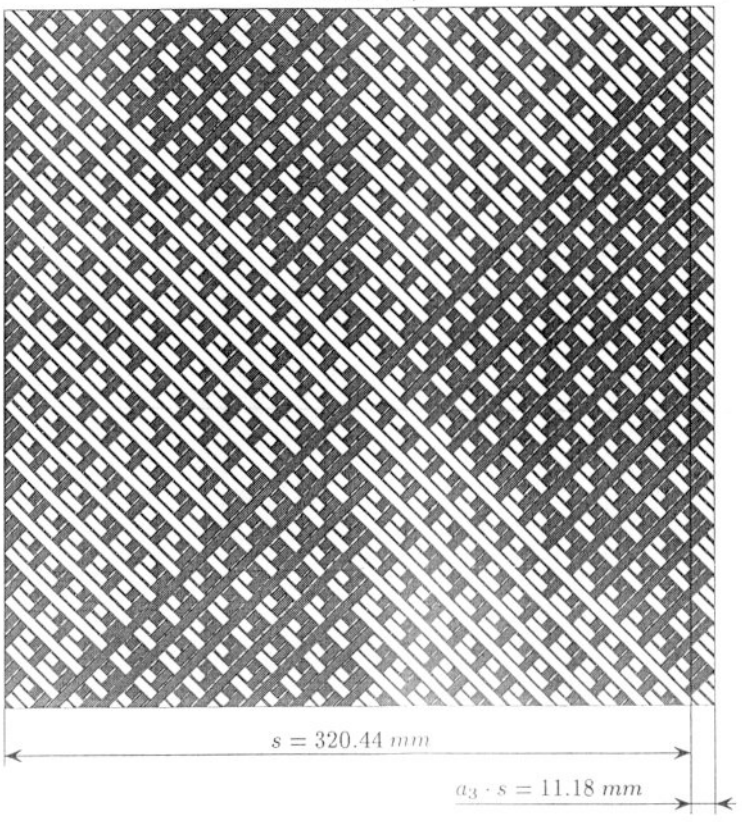
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/2



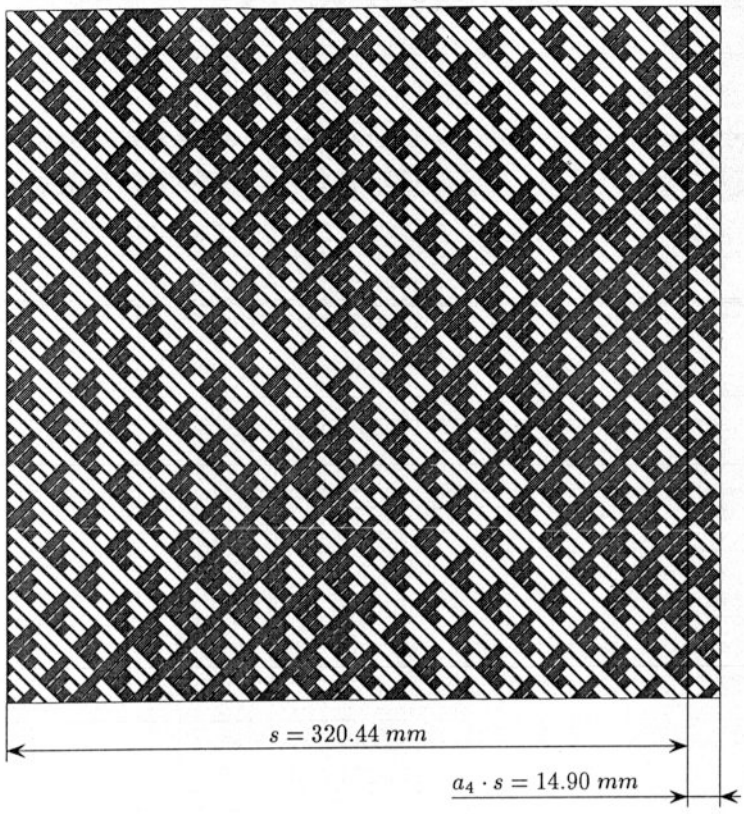
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/3



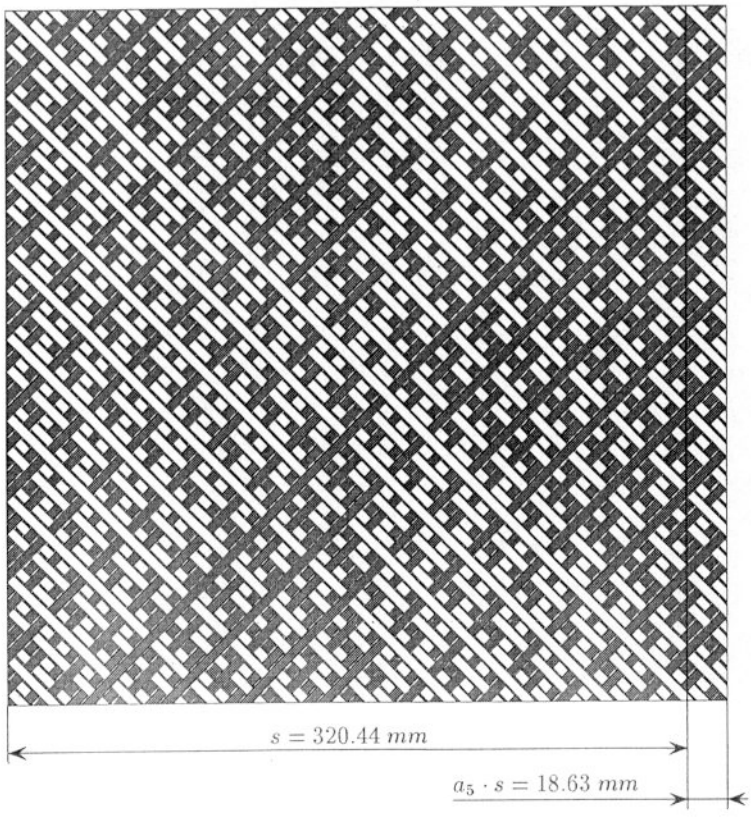
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/4



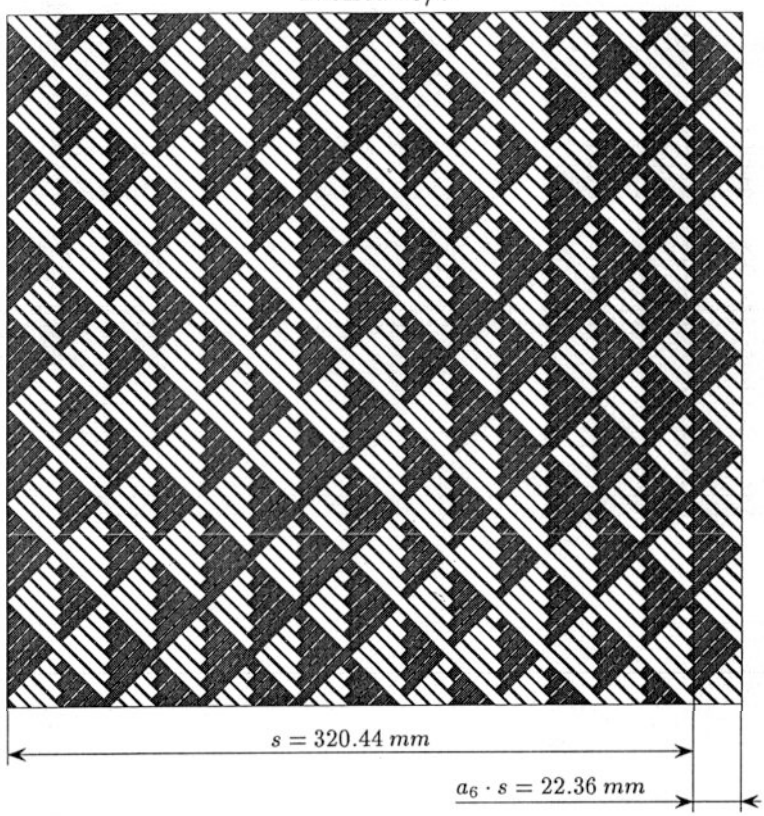
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/5



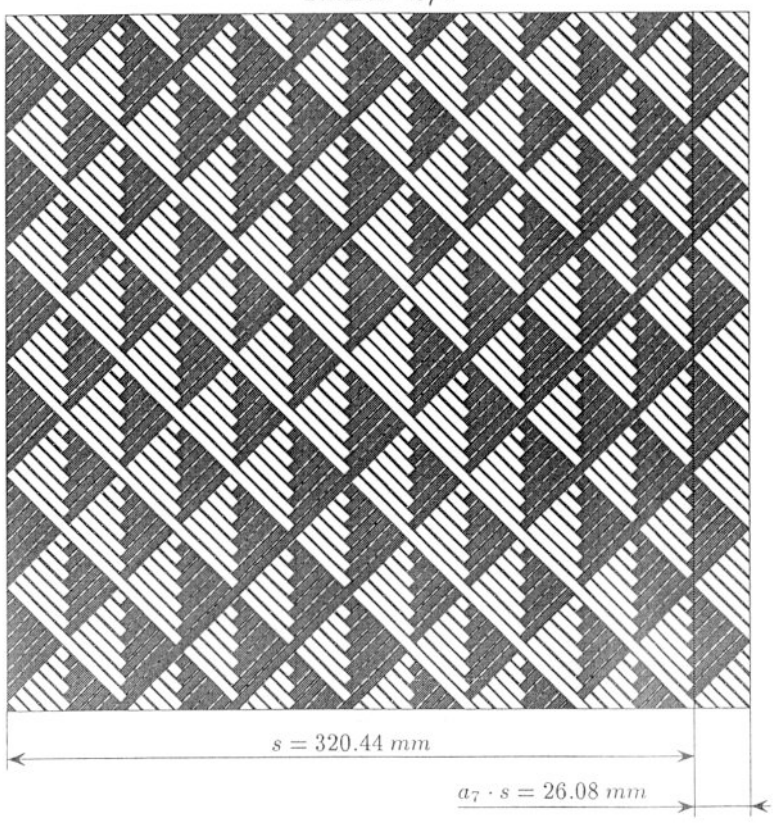
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/6



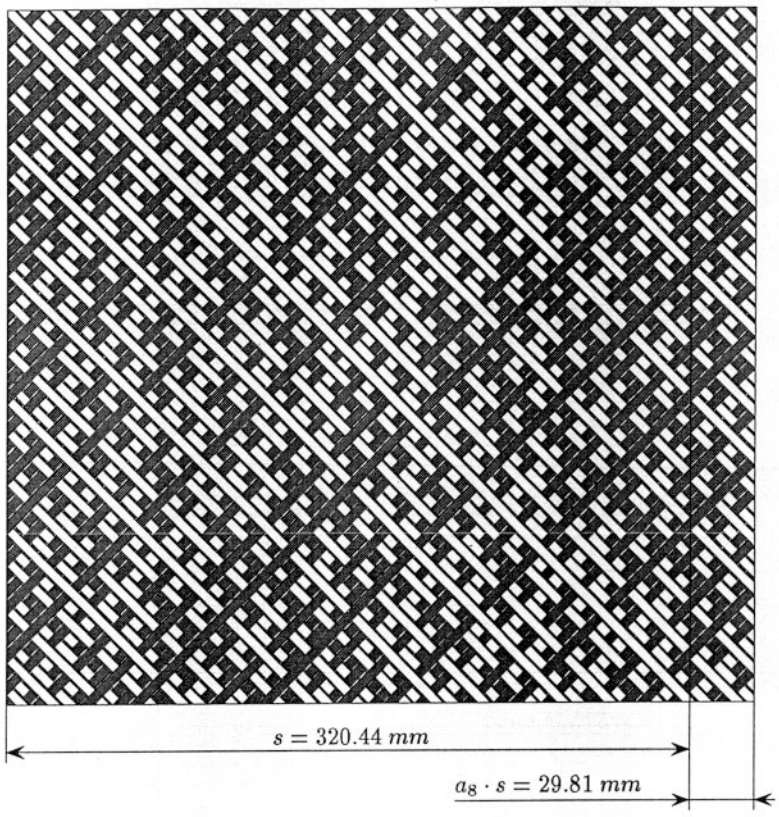
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/7



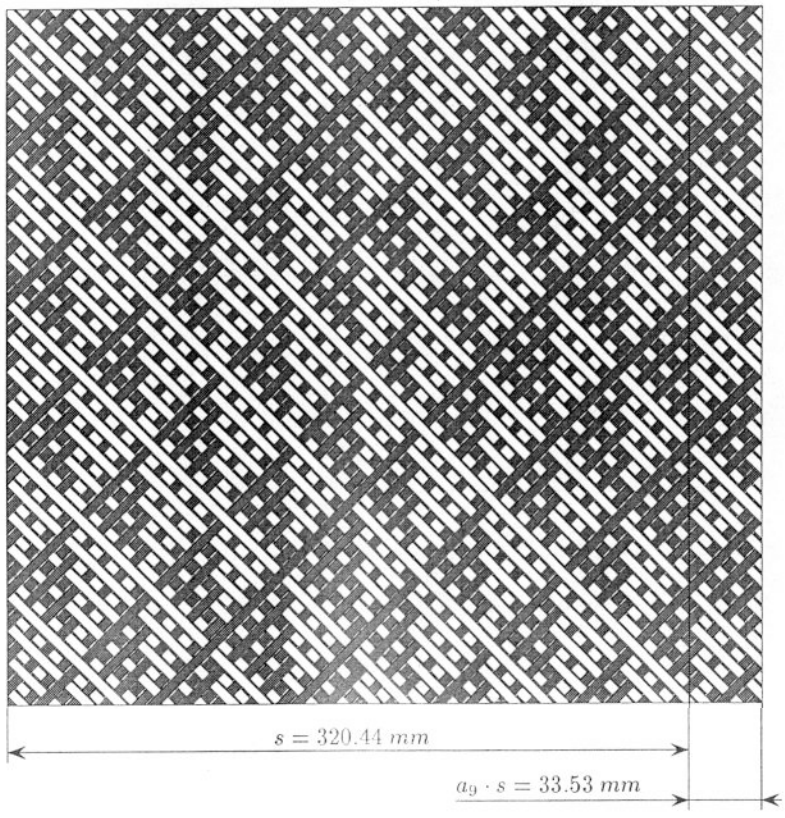
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/8



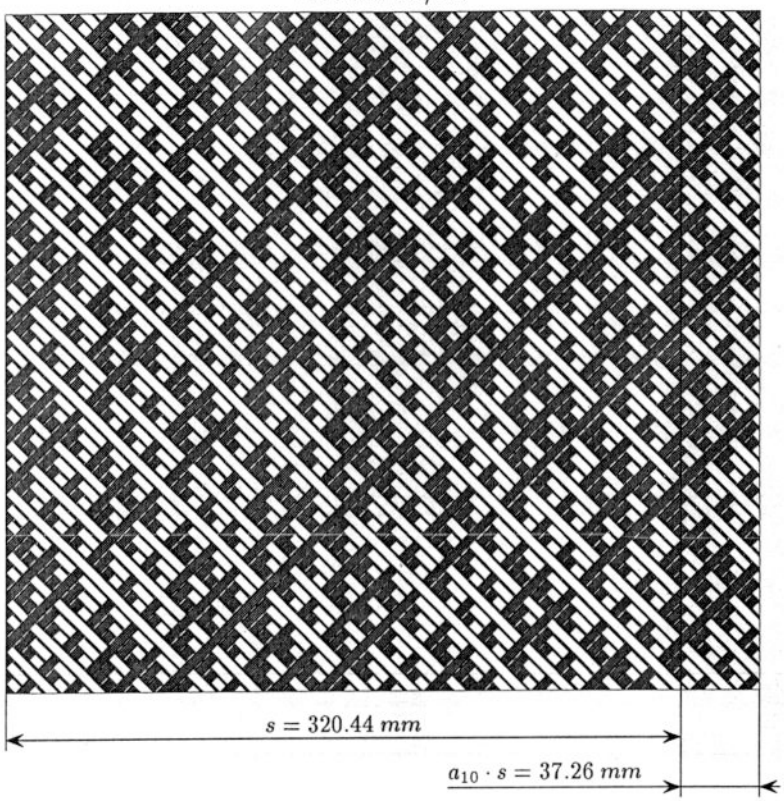
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/9



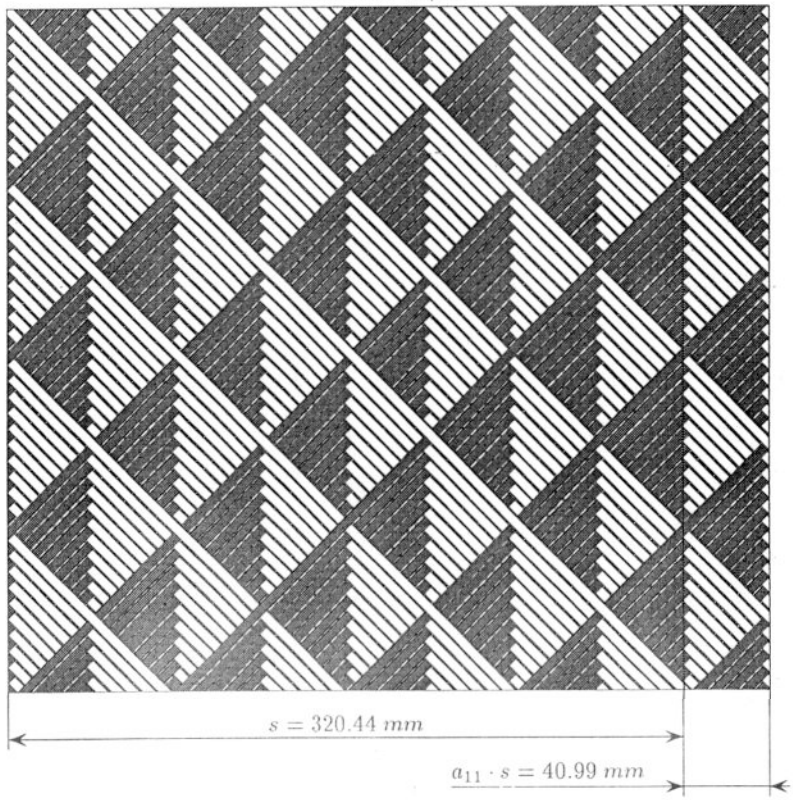
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/10



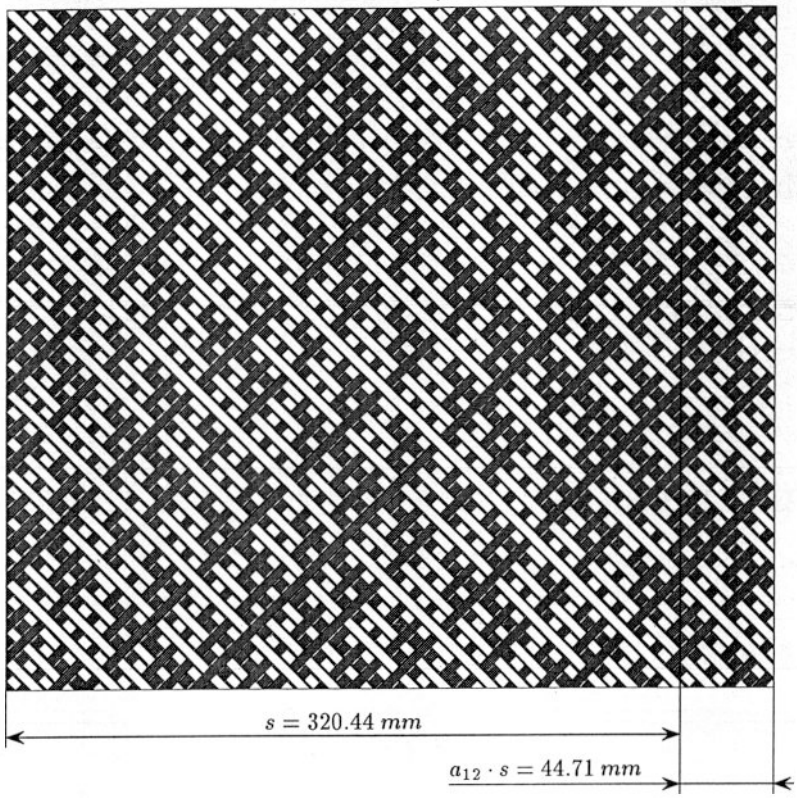
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/11



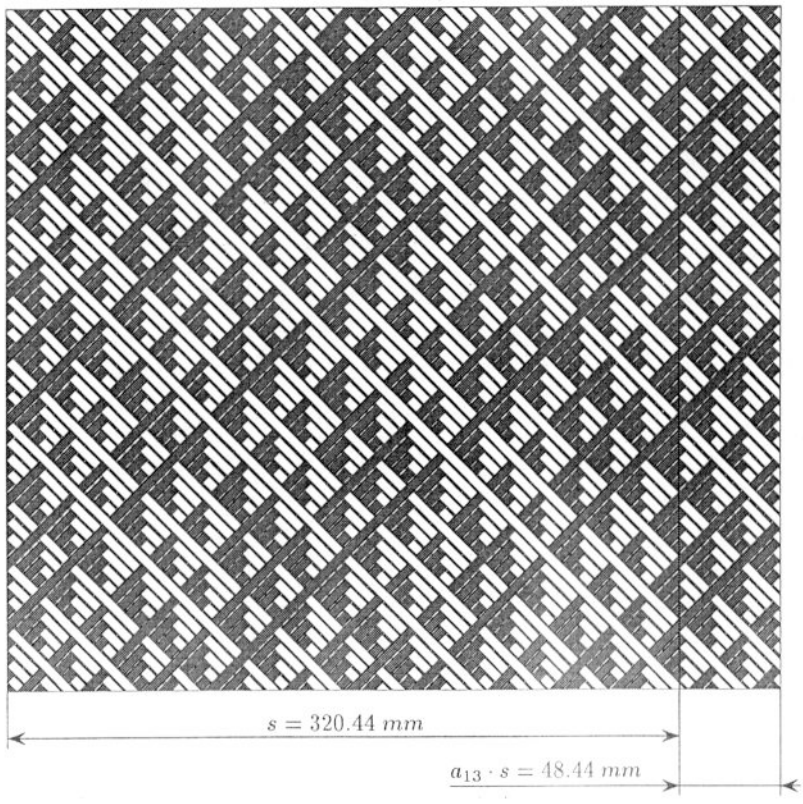
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/12



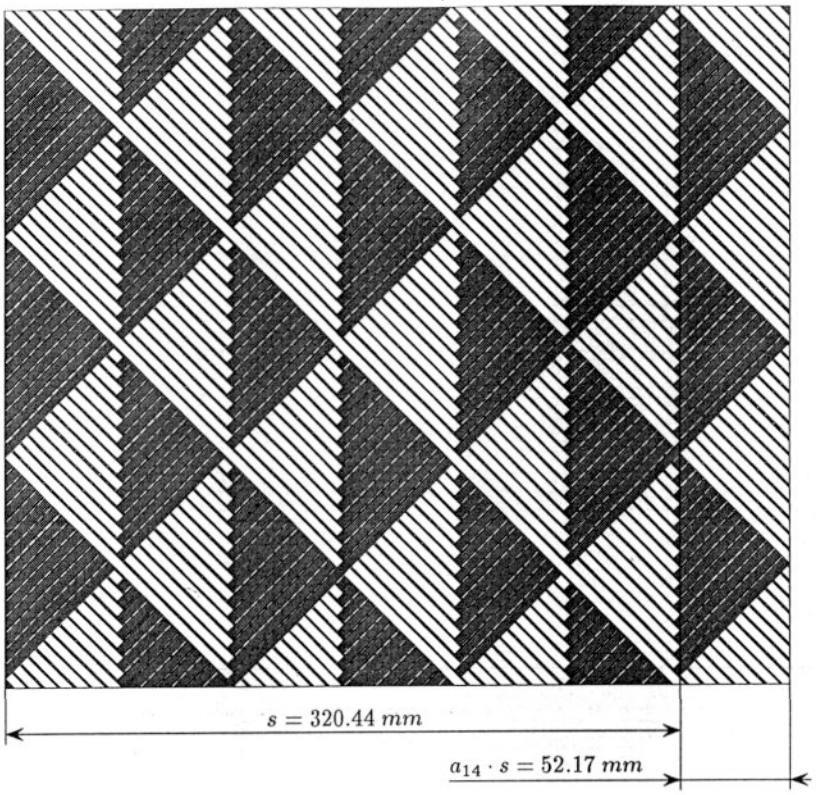
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/13



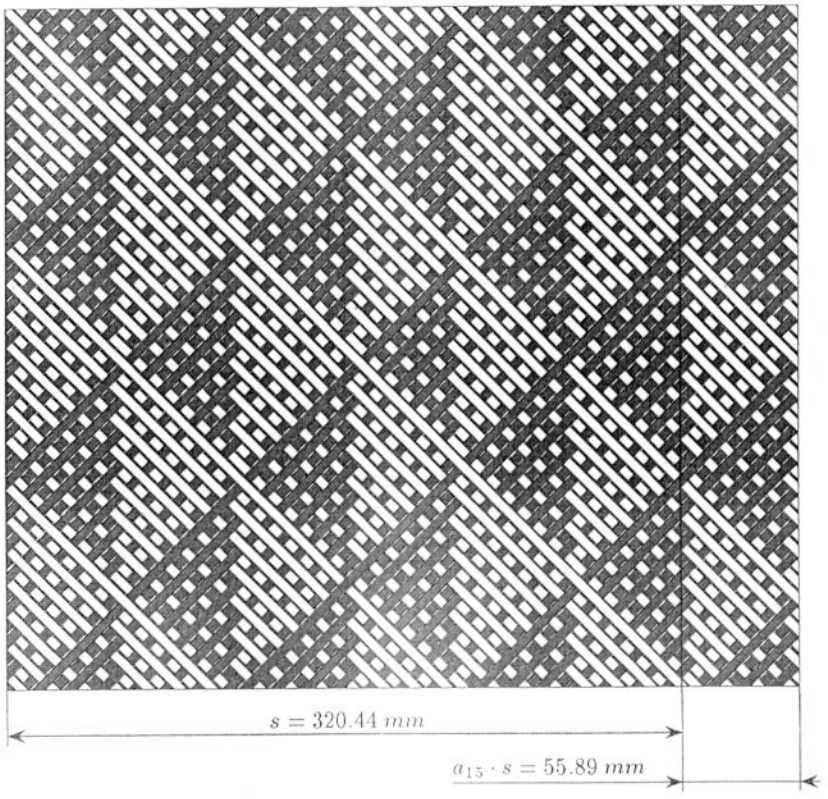
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/14



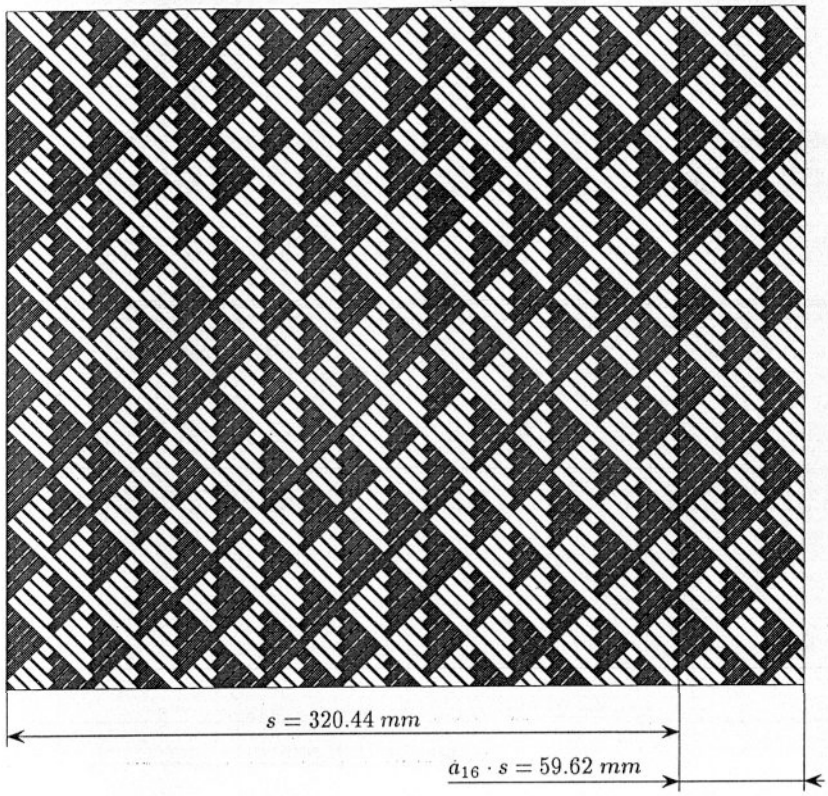
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/15



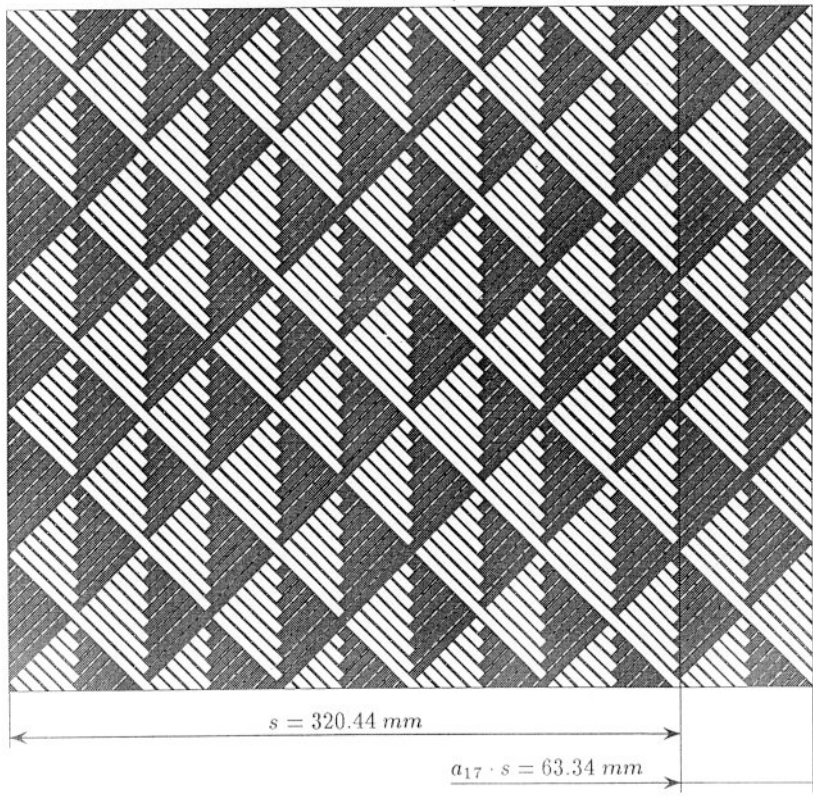
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/16



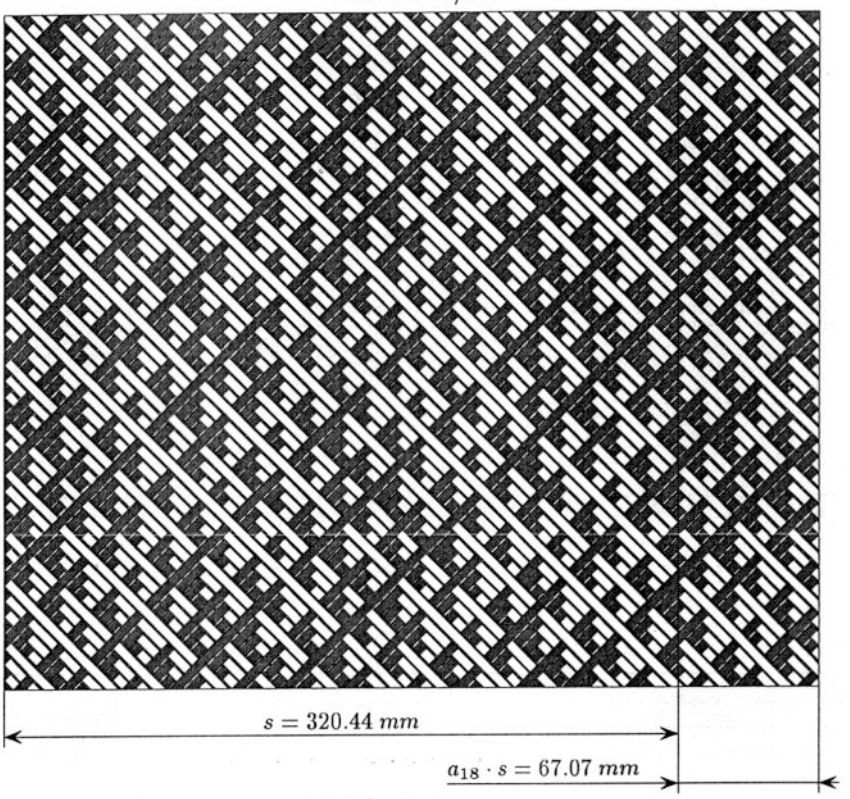
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/17



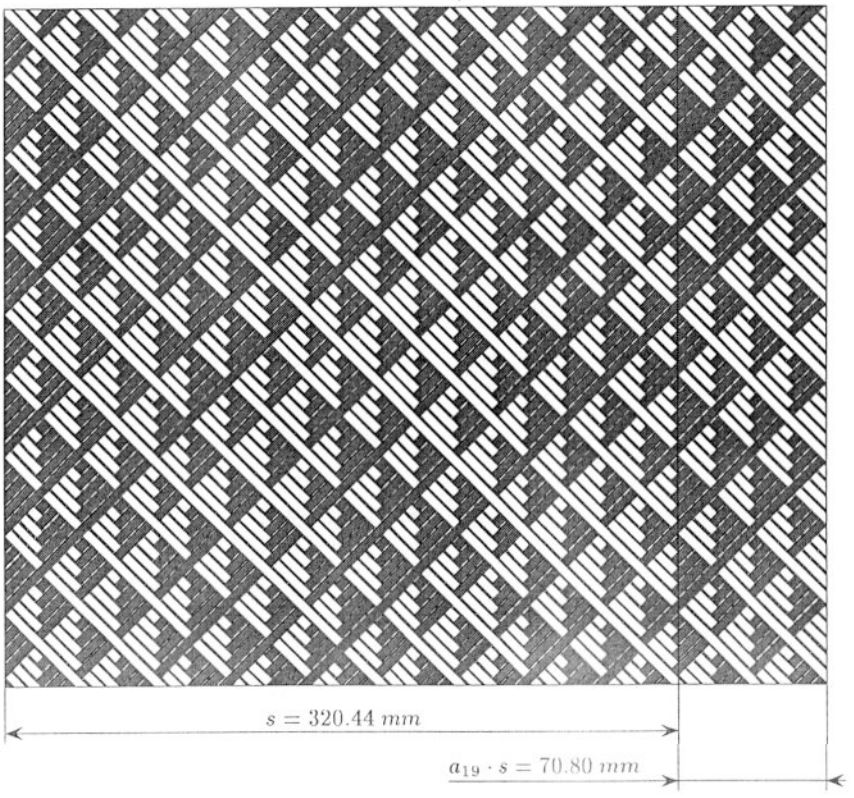
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/18



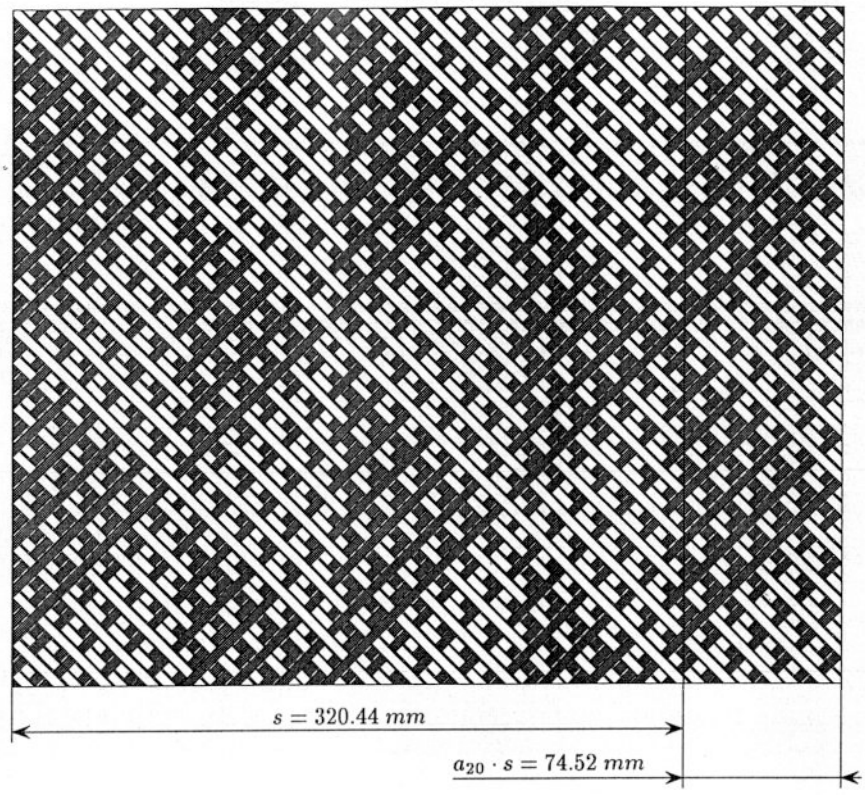
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/19



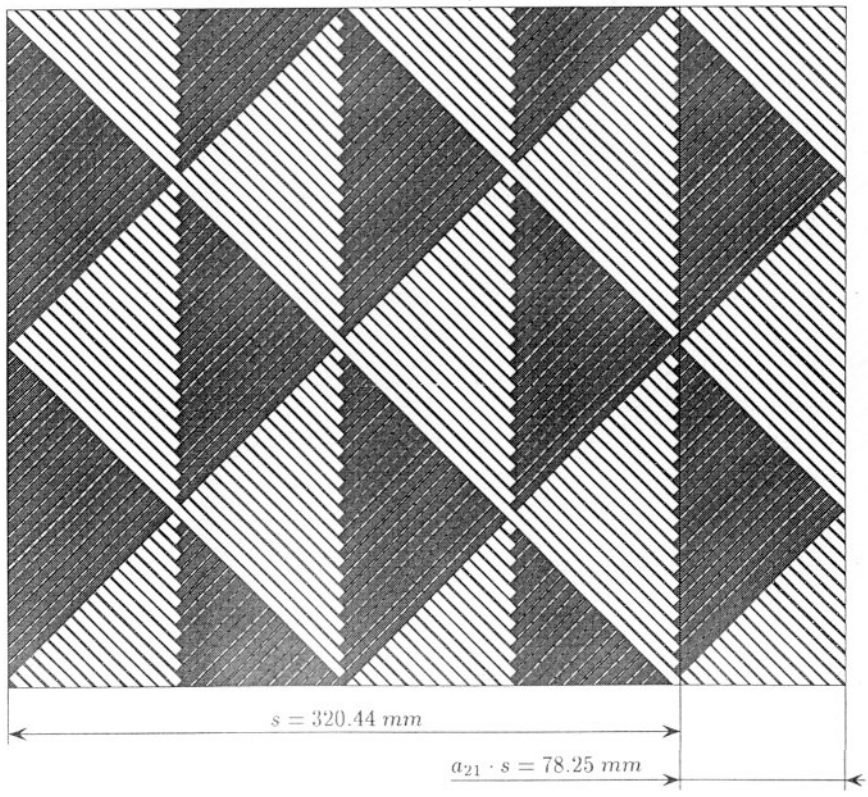
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 43/20



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

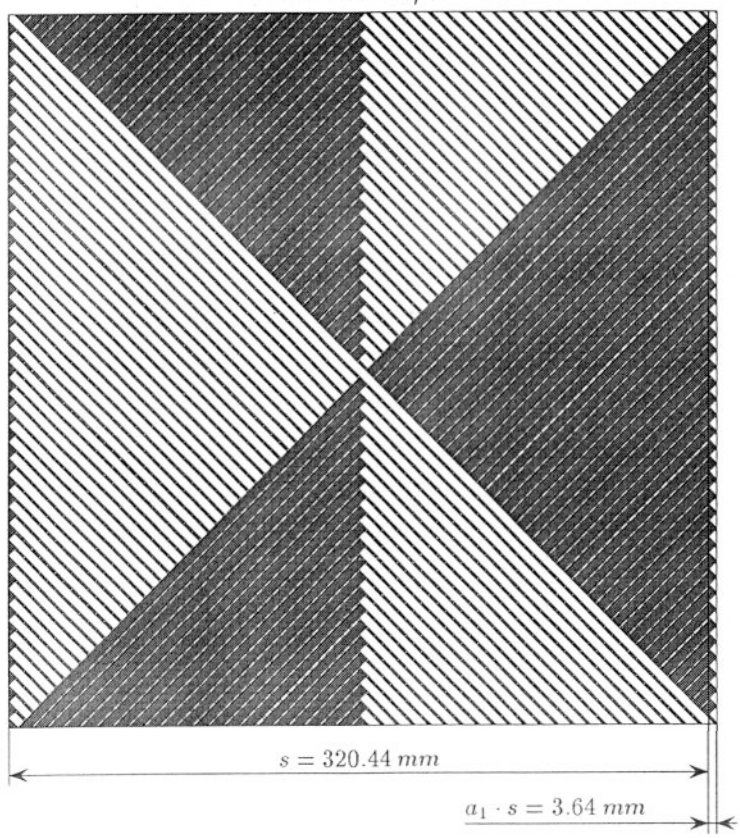
Tablica 43/21



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

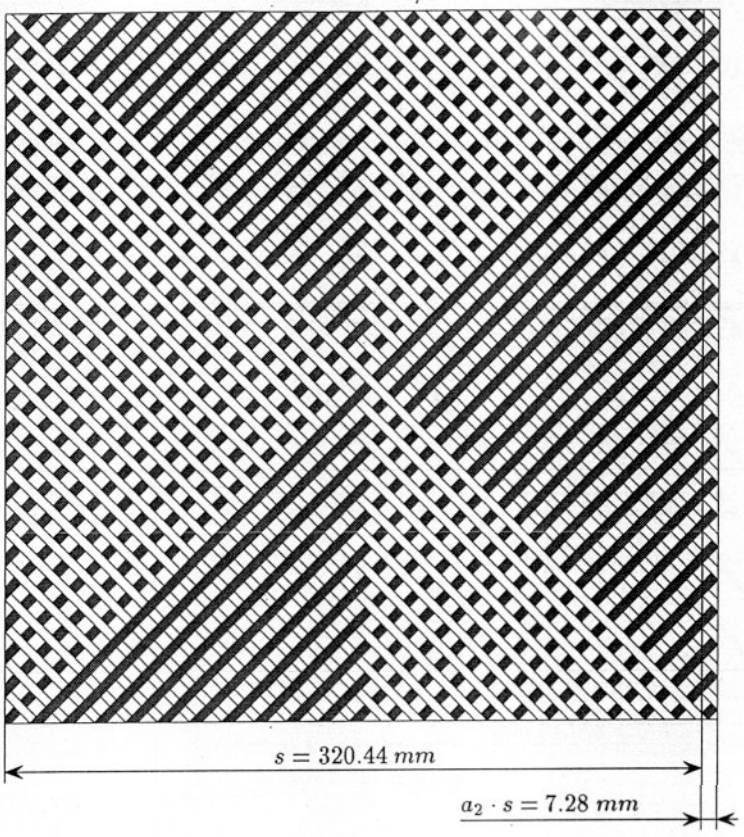
Liczba wiązek rowingu: 44																																															a_{Nr} =
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																															= $Nr/(2 \cdot 44)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	1/88
2	0	1	0	2	0	3	0	4	0	5	0	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0	11	0	12	0	13	0	14	0	15	0	16	0	17	0	18	0	19	0	20	0	21	0	22	2/88
3	15	30	1	16	31	2	17	32	3	18	33	4	19	34	5	20	35	6	21	36	7	22	37	8	23	38	9	24	39	10	25	40	11	26	41	12	27	42	13	28	43	14	29	44	3/88
4	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0	5	0	0	0	6	0	0	0	7	0	0	0	8	0	0	0	9	0	0	0	10	0	0	0	11	4/88
5	9	18	27	36	1	10	19	28	37	2	11	20	29	38	3	12	21	30	39	4	13	22	31	40	5	14	23	32	41	6	15	24	33	42	7	16	25	34	43	8	17	26	35	44	5/88
6	0	15	0	8	0	1	0	16	0	9	0	2	0	17	0	10	0	3	0	18	0	11	0	4	0	19	0	12	0	5	0	20	0	13	0	6	0	21	0	14	0	7	0	22	6/88
7	19	38	13	32	7	26	1	20	39	14	33	8	27	2	21	40	15	34	9	28	3	22	41	16	35	10	29	4	23	42	17	36	11	30	5	24	43	18	37	12	31	6	25	44	7/88
8	0	0	0	6	0	0	0	1	0	0	0	7	0	0	0	2	0	0	0	8	0	0	0	3	0	0	0	9	0	0	0	4	0	0	0	10	0	0	0	5	0	0	0	11	8/88
9	5	10	15	20	25	30	35	40	1	6	11	16	21	26	31	36	41	2	7	12	17	22	27	32	37	42	3	8	13	18	23	28	33	38	43	4	9	14	19	24	29	34	39	44	9/88
10	0	9	0	18	0	5	0	14	0	1	0	10	0	19	0	6	0	15	0	2	0	11	0	20	0	7	0	16	0	3	0	12	0	21	0	8	0	17	0	4	0	13	0	22	10/88
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	11/88
12	0	0	0	4	0	0	0	8	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	0	9	0	0	0	2	0	0	0	6	0	0	0	10	0	0	0	3	0	0	0	7	0	0	0	11	12/88
13	17	34	7	24	41	14	31	4	21	38	11	28	1	18	35	8	25	42	15	32	5	22	39	12	29	2	19	36	9	26	43	16	33	6	23	40	13	30	3	20	37	10	27	44	13/88
14	0	19	0	16	0	13	0	10	0	7	0	4	0	1	0	20	0	17	0	14	0	11	0	8	0	5	0	2	0	21	0	18	0	15	0	12	0	9	0	6	0	3	0	22	14/88
15	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	15/88
16	0	0	0	3	0	0	0	6	0	0	0	9	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0	7	0	0	0	10	0	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	8	0	0	0	11	16/88
17	13	26	39	8	21	34	3	16	29	42	11	24	37	6	19	32	1	14	27	40	9	22	35	4	17	30	43	12	25	38	7	20	33	2	15	28	41	10	23	36	5	18	31	44	17/88
18	0	5	0	10	0	15	0	20	0	3	0	8	0	13	0	18	0	1	0	6	0	11	0	16	0	21	0	4	0	9	0	14	0	19	0	2	0	7	0	12	0	17	0	22	18/88
19	7	14	21	28	35	42	5	12	19	26	33	40	3	10	17	24	31	38	1	8	15	22	29	36	43	6	13	20	27	34	41	4	11	18	25	32	39	2	9	16	23	30	37	44	19/88
20	0	0	0	9	0	0	0	7	0	0	0	5	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	10	0	0	0	8	0	0	0	6	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0	0	11	20/88
21	21	42	19	40	17	38	15	36	13	34	11	32	9	30	7	28	5	26	3	24	1	22	43	20	41	18	39	16	37	14	35	12	33	10	31	8	29	6	27	4	25	2	23	44	21/88
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22/88

Tablica 44/1



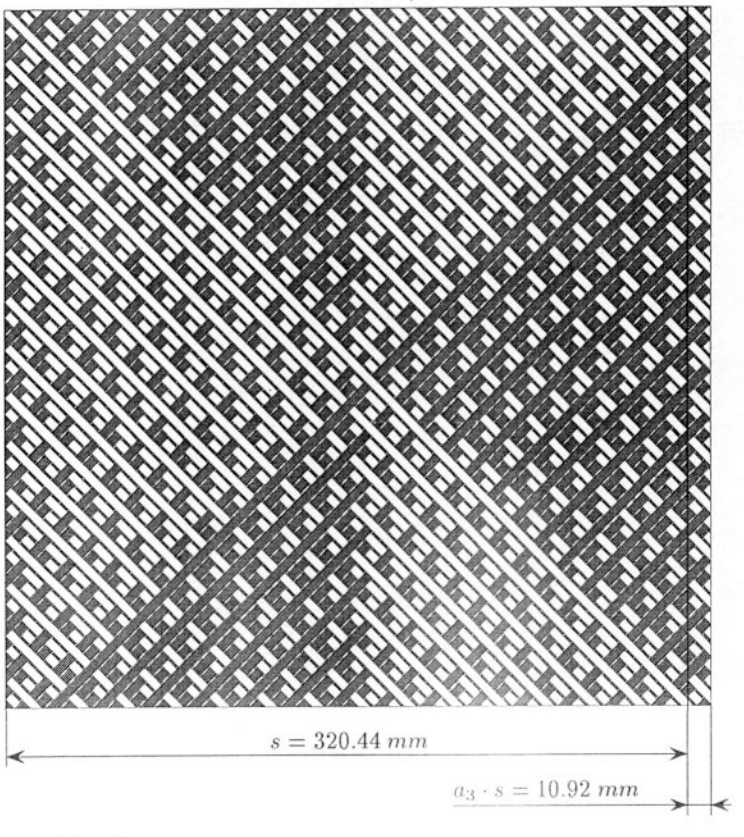
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/2



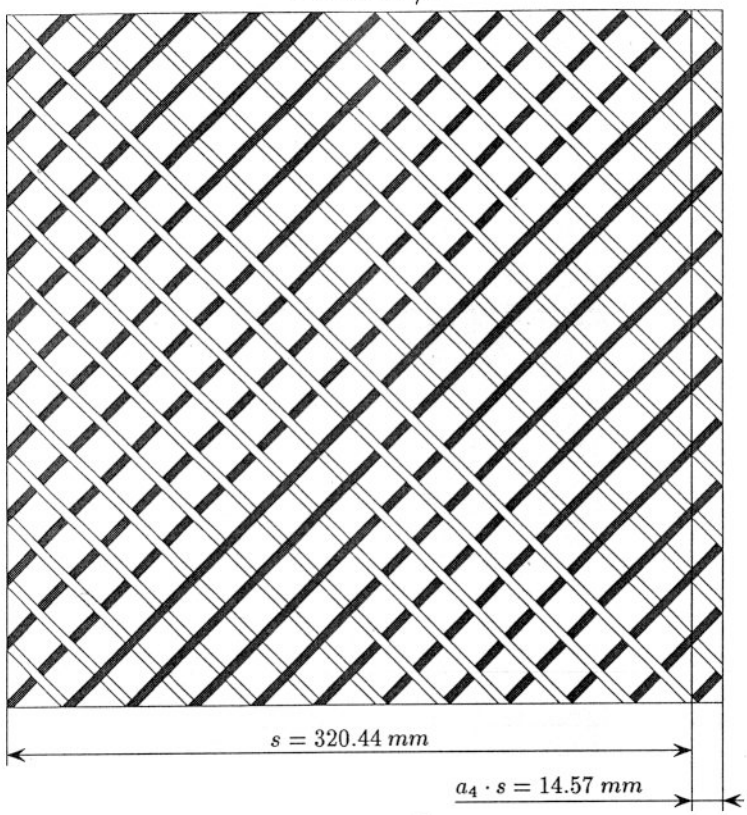
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/3



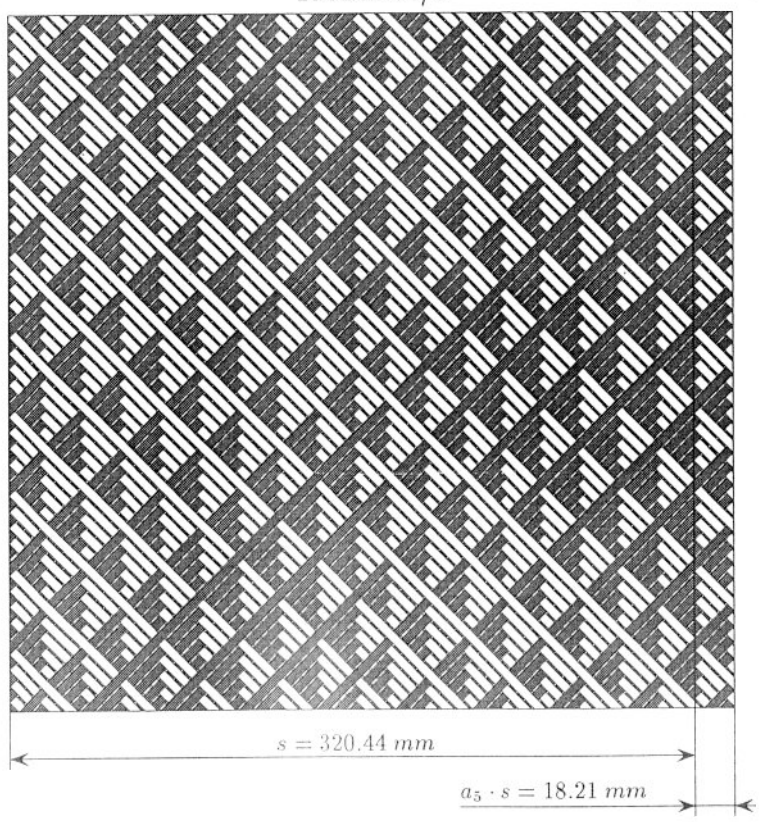
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/4



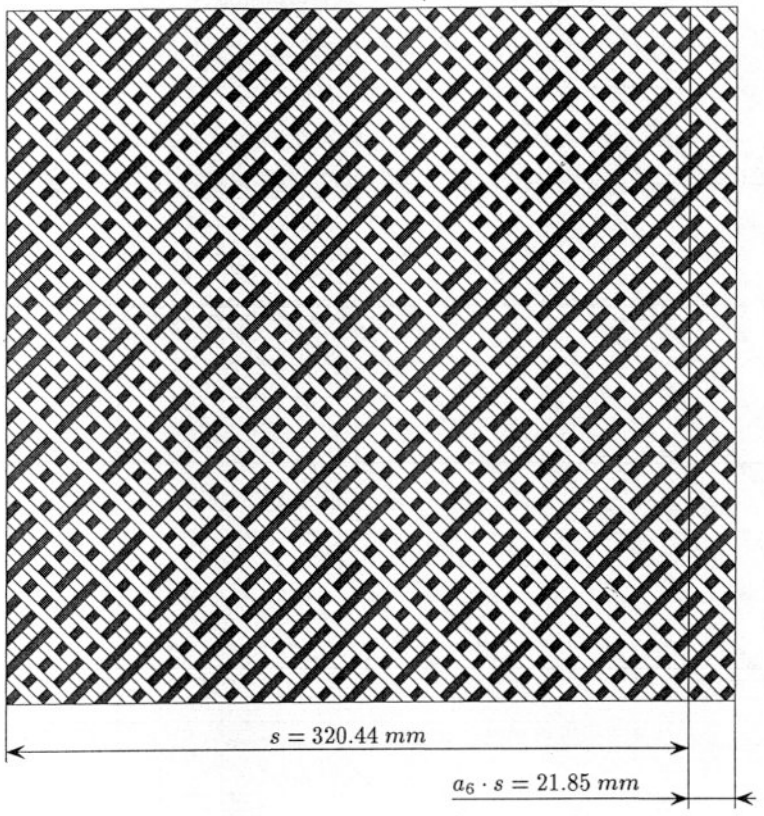
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/5



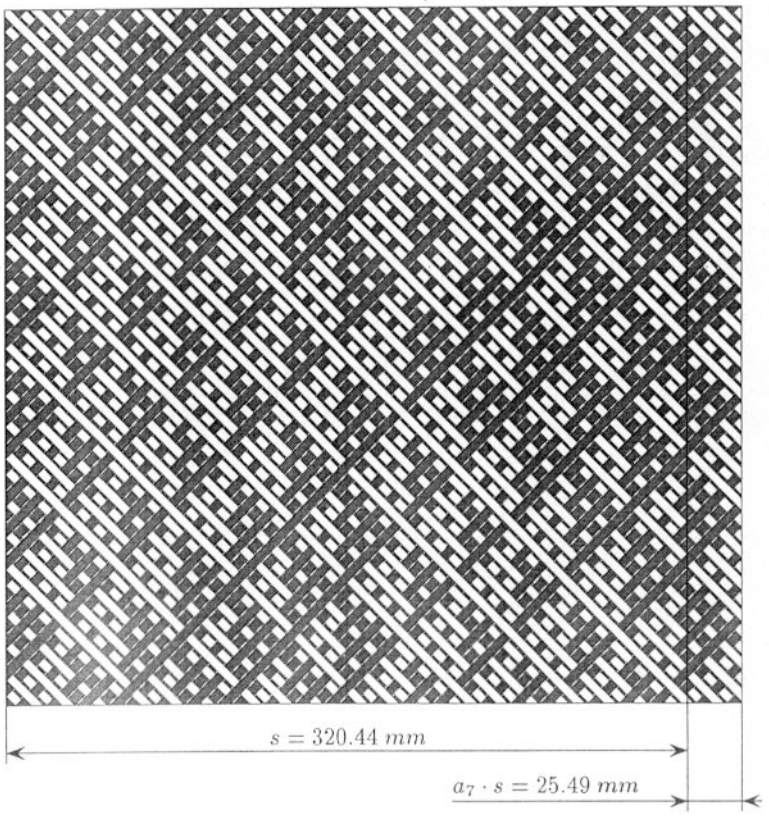
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/6



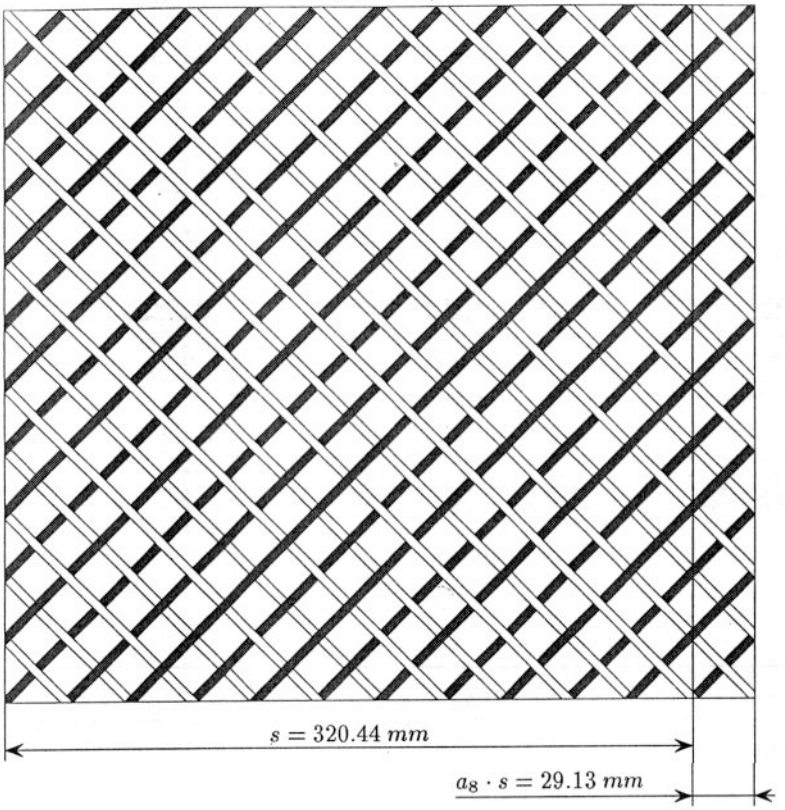
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 44/7



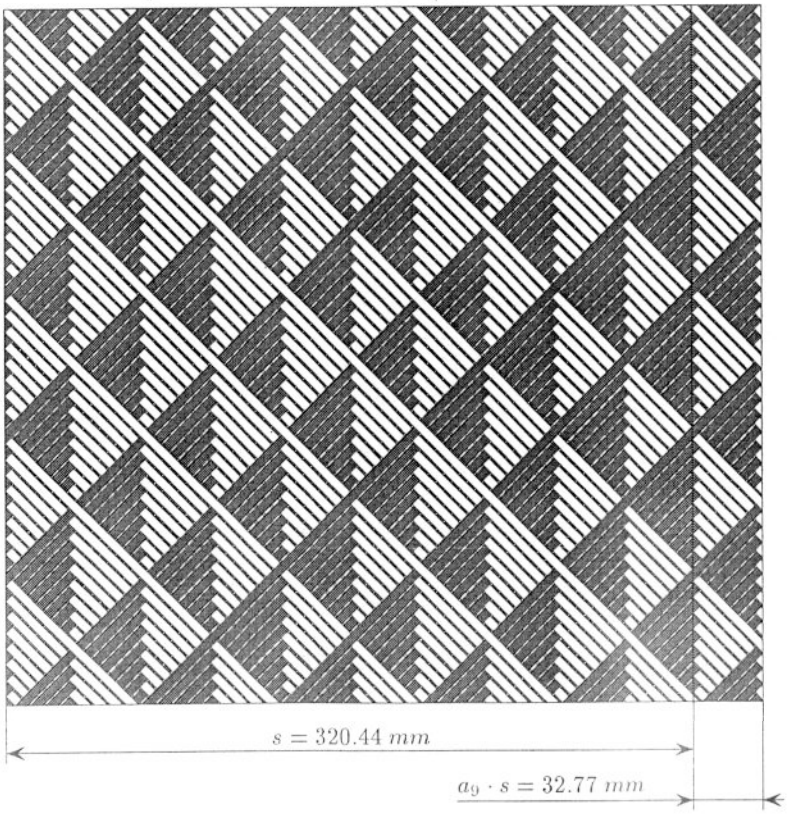
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 44/8



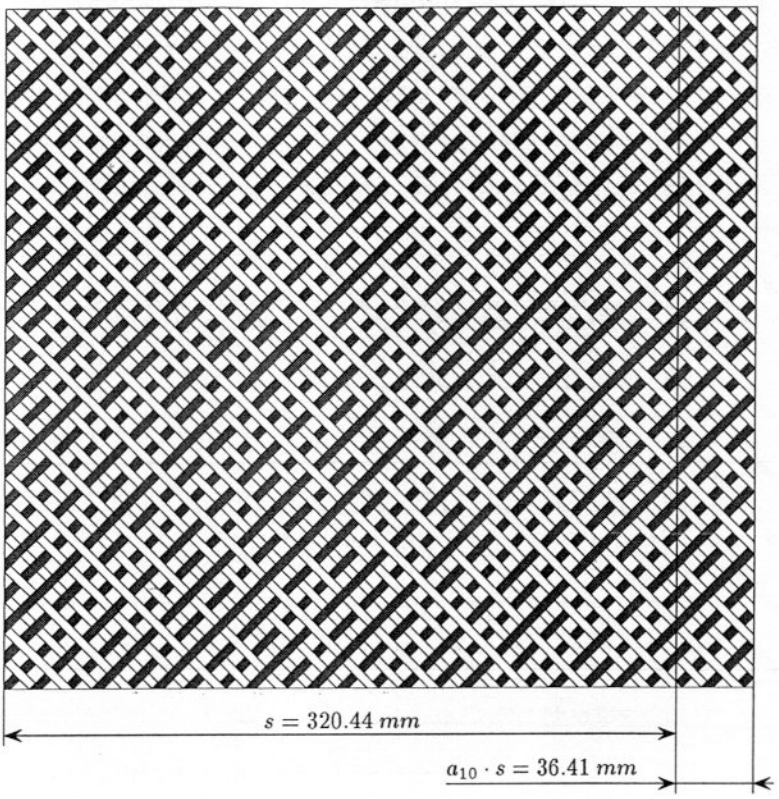
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/9



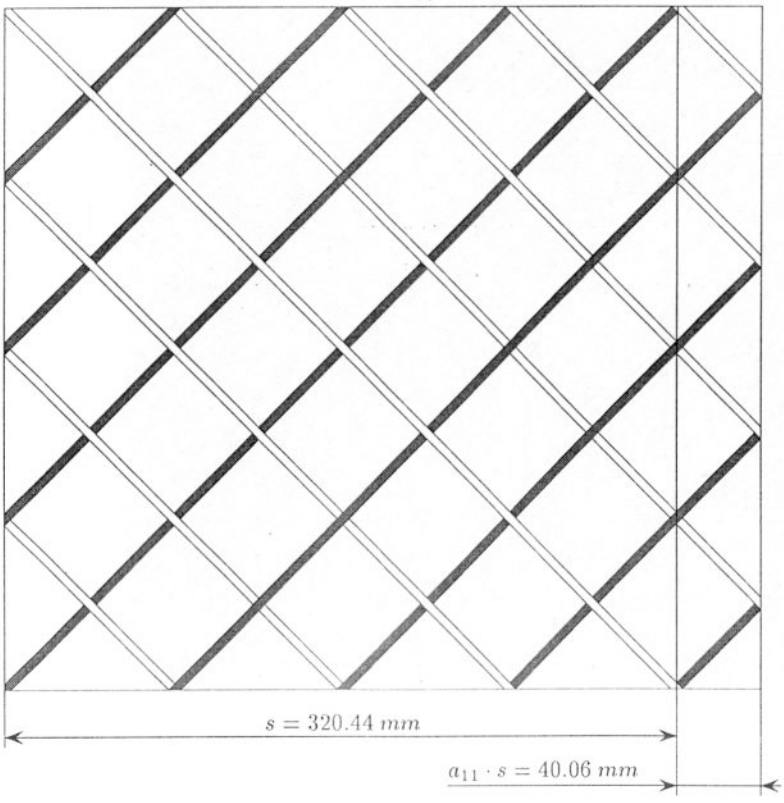
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/10



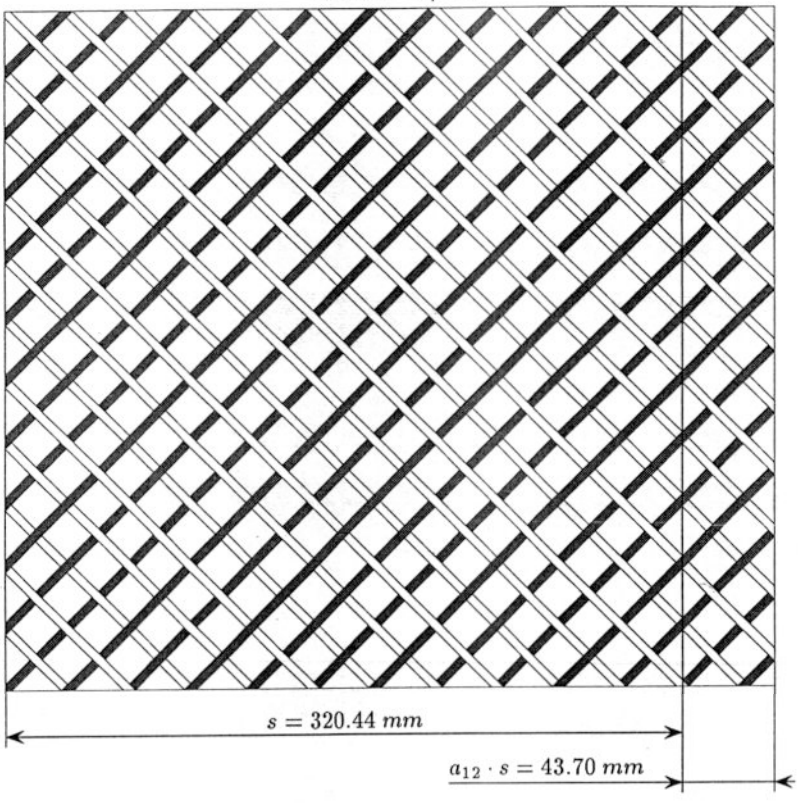
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/11



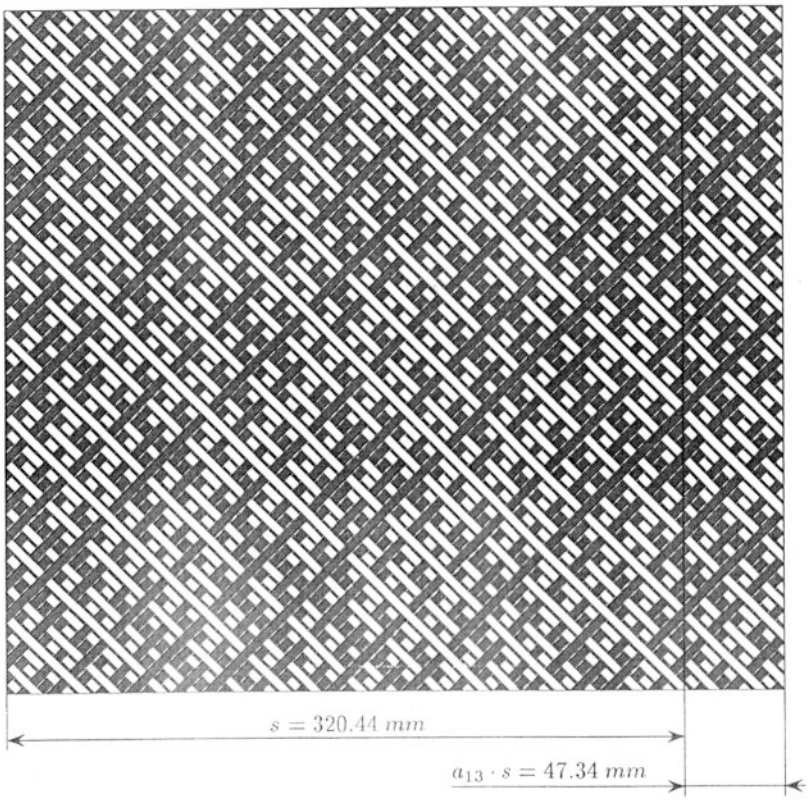
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/12



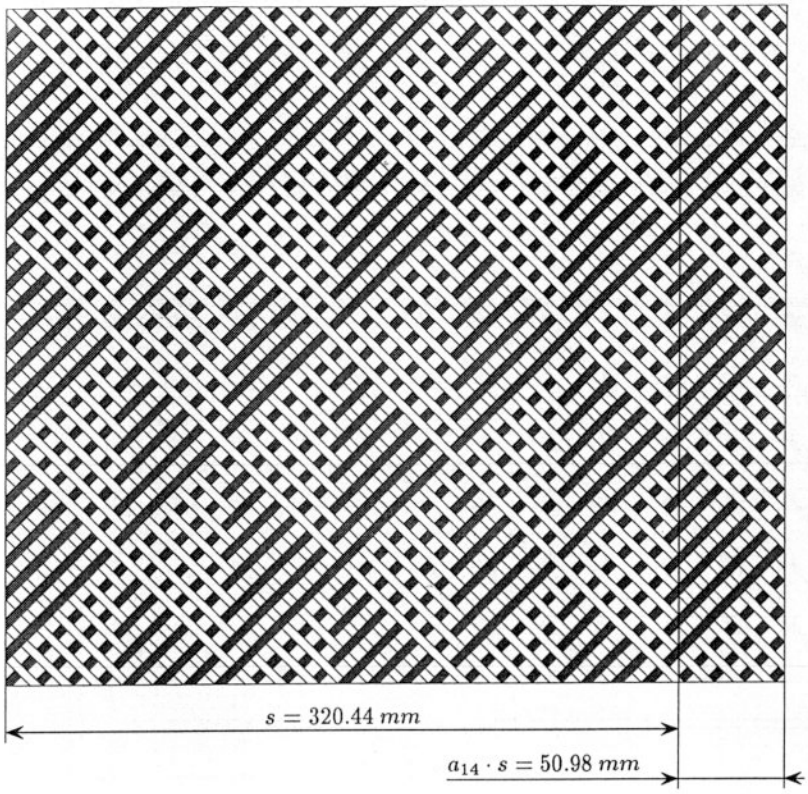
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/13



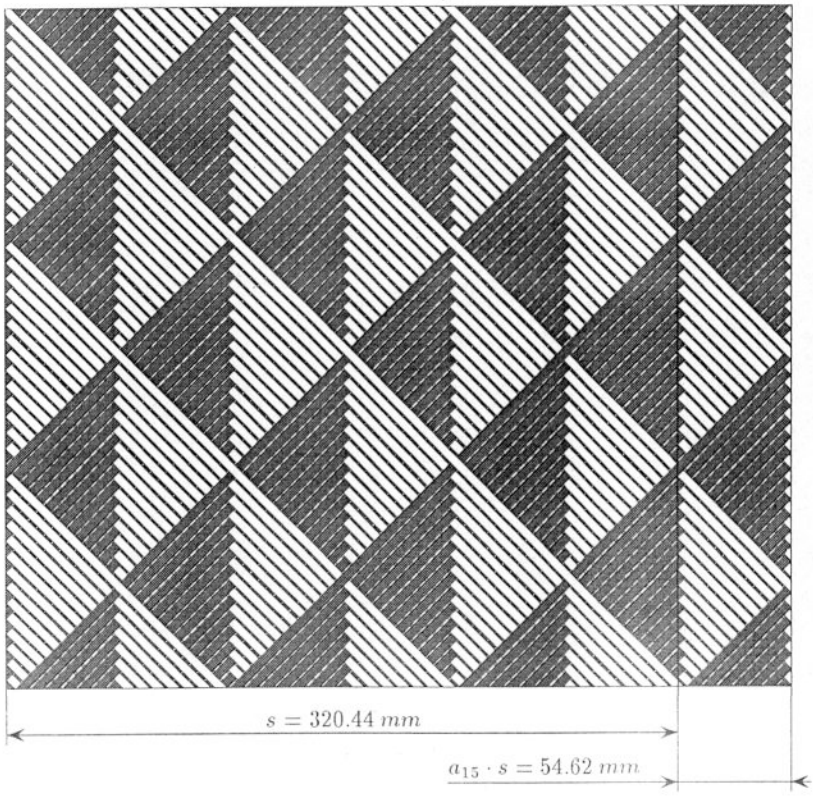
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/14



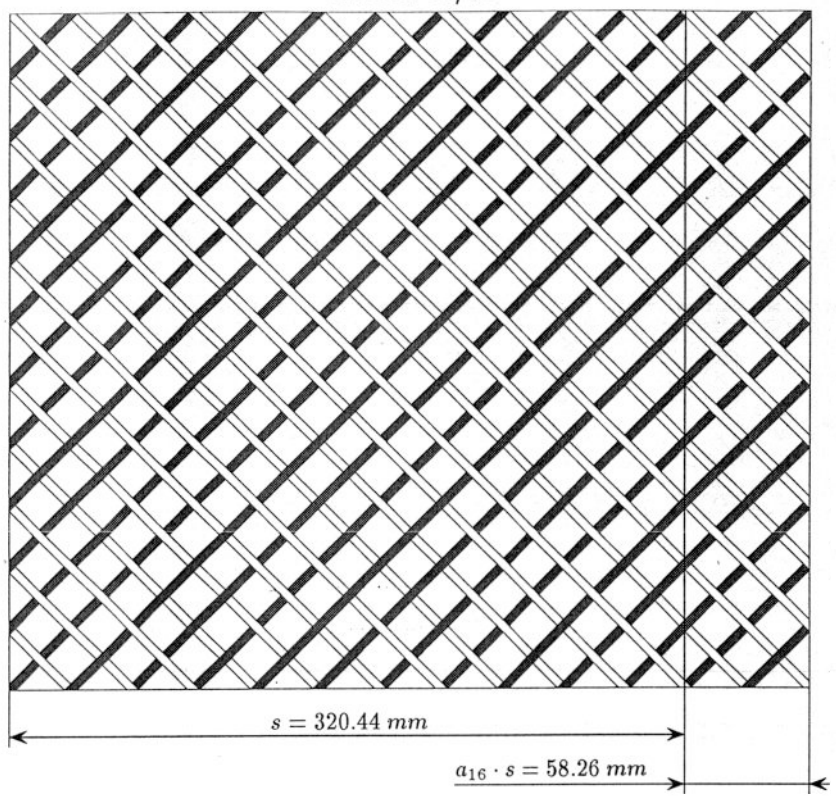
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/15



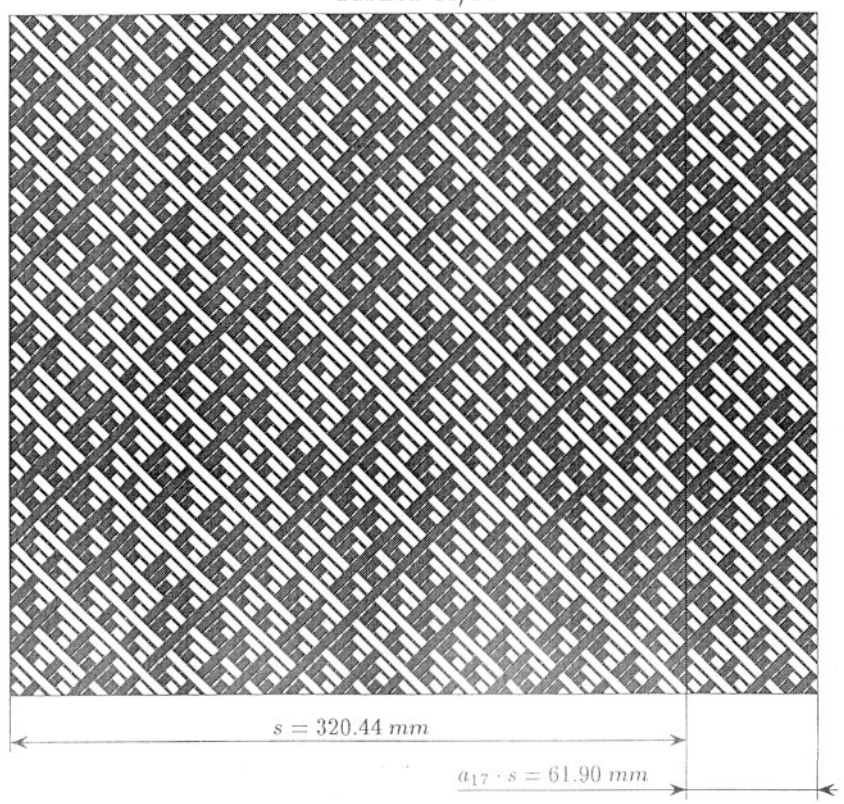
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/16



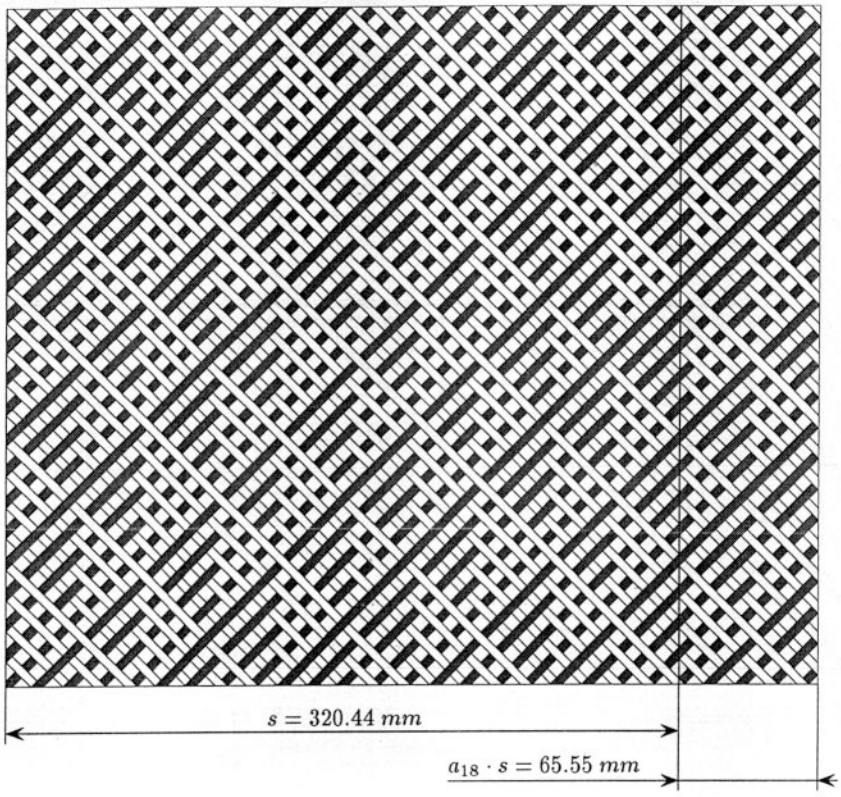
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/17



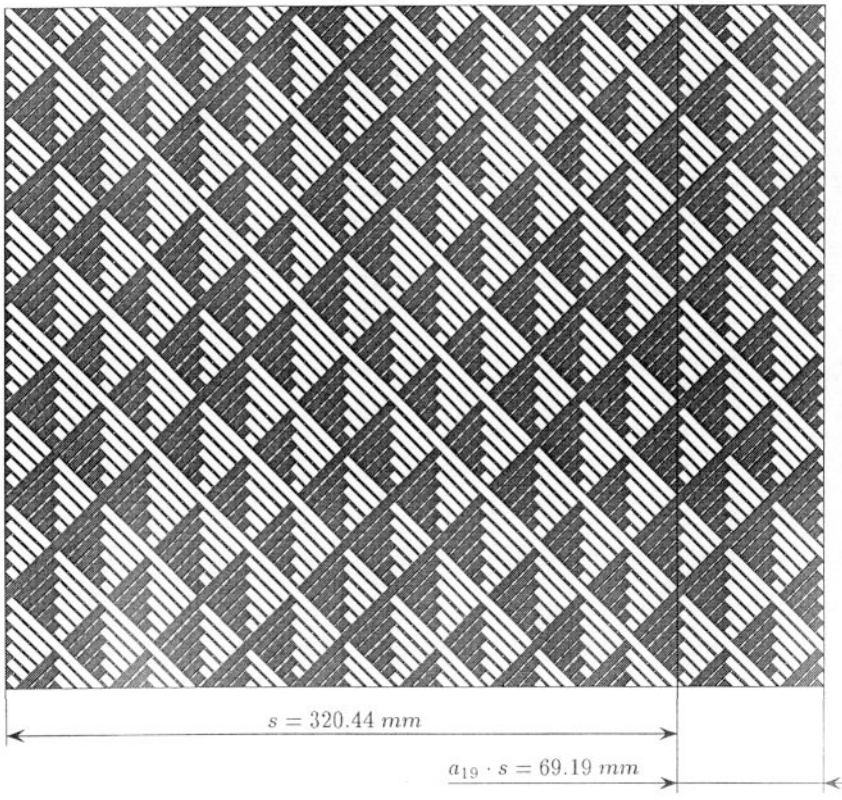
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/18



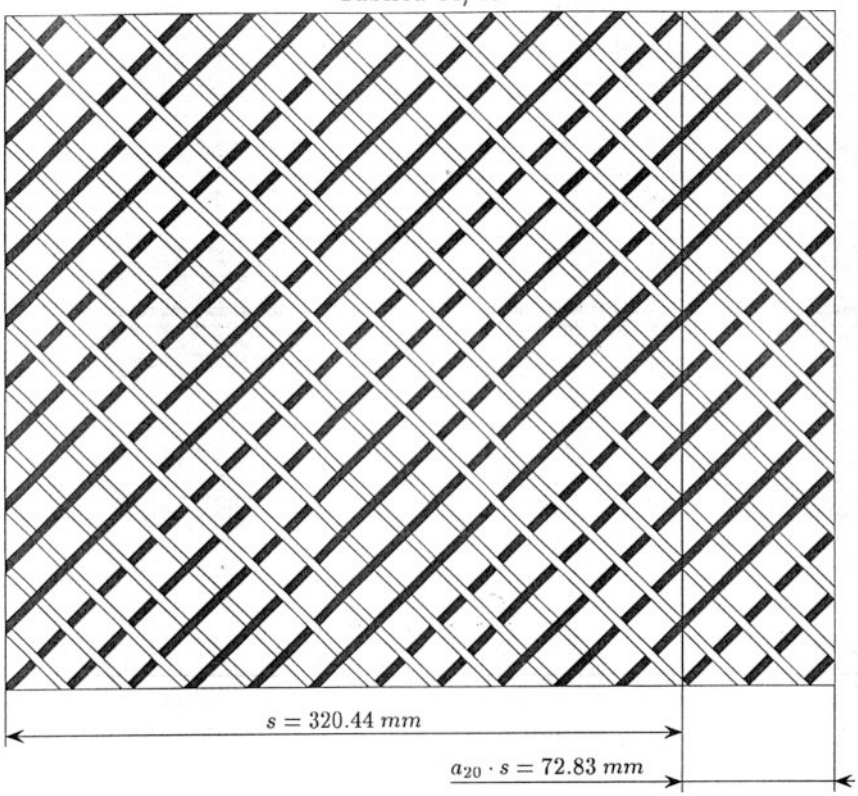
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/19



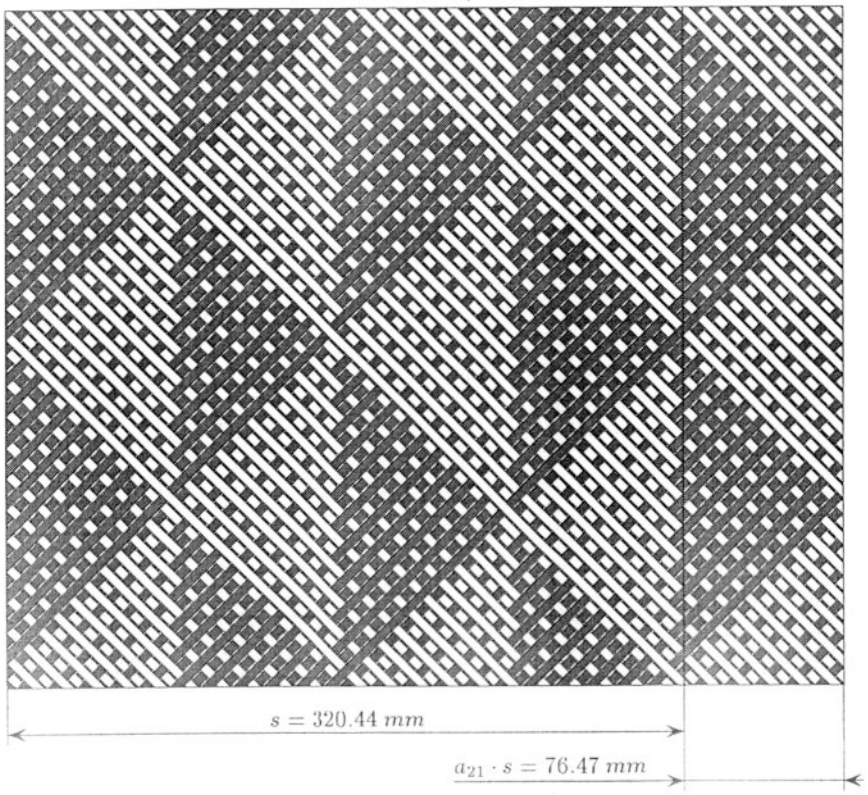
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/20



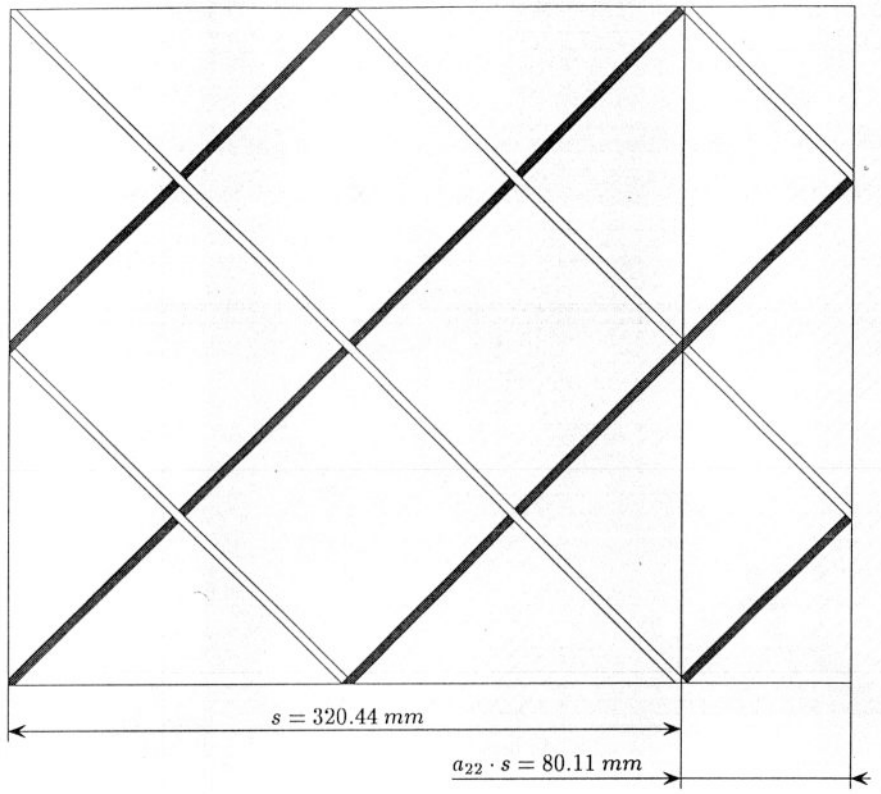
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 44/21



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

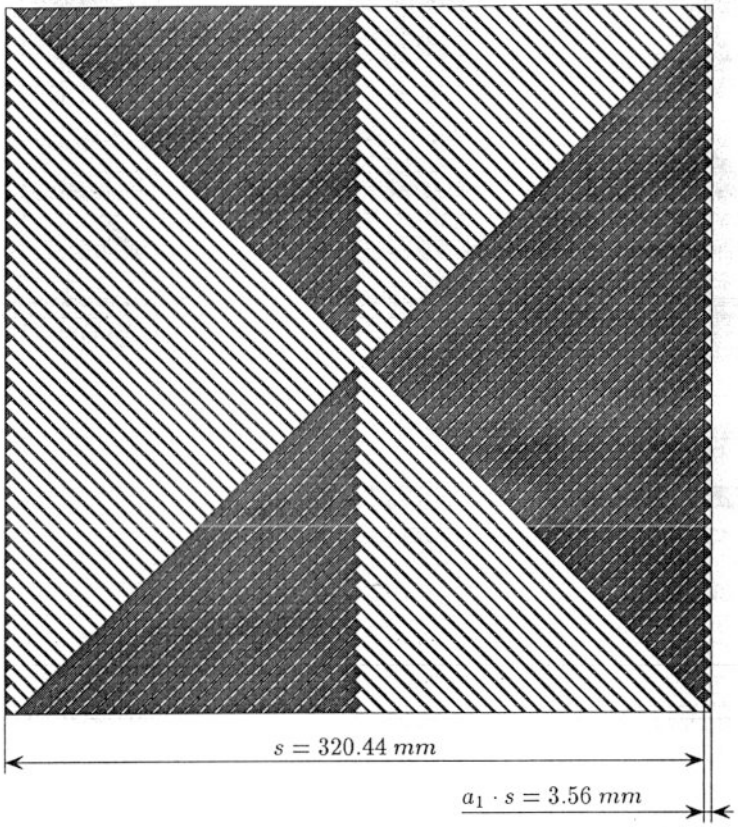
Tablica 44/22



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

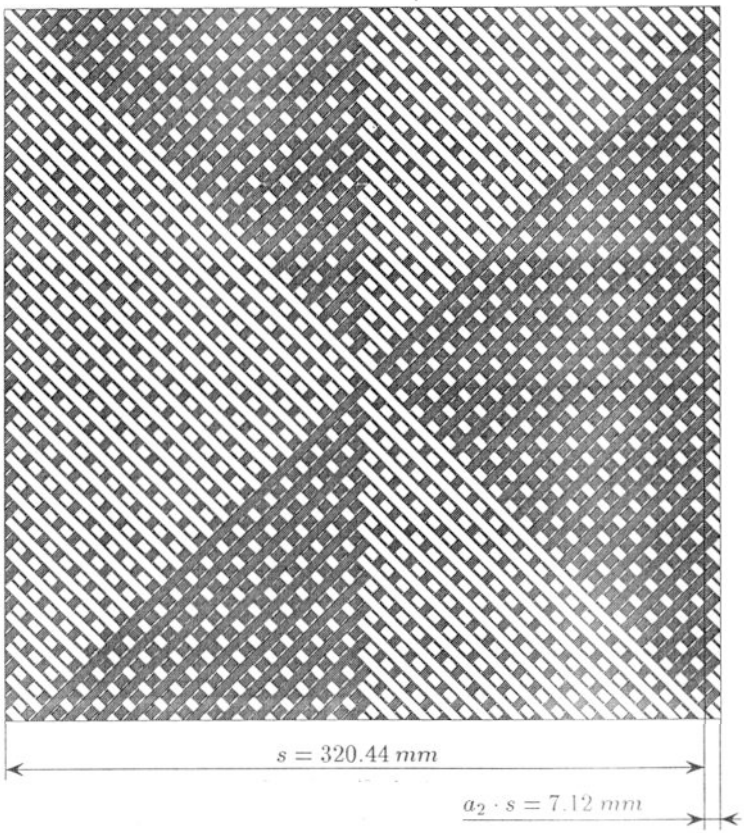
Liczba wiązek rowingu: 45																																										$a_{Nr} =$
Nr	← $\pi \cdot d$ →																																										$= Nr/(2 \cdot 45)$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	1/90
2	23	1	24	2	25	3	26	4	27	5	28	6	29	7	30	8	31	9	32	10	33	11	34	12	35	13	36	14	37	15	38	16	39	17	40	18	41	19	42	20	43	21	44	22	45	2/90
3	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	6	0	0	7	0	0	8	0	0	9	0	0	10	0	0	11	0	0	12	0	0	13	0	0	14	0	0	15	3/90
4	34	23	12	1	35	24	13	2	36	25	14	3	37	26	15	4	38	27	16	5	39	28	17	6	40	29	18	7	41	30	19	8	42	31	20	9	43	32	21	10	44	33	22	11	45	4/90
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	5	0	0	0	0	6	0	0	0	0	7	0	0	0	0	8	0	0	0	0	9	5/90
6	0	0	8	0	0	1	0	0	9	0	0	2	0	0	10	0	0	3	0	0	11	0	0	4	0	0	12	0	0	5	0	0	13	0	0	6	0	0	14	0	0	7	0	0	15	6/90
7	13	26	39	7	20	33	1	14	27	40	8	21	34	2	15	28	41	9	22	35	3	16	29	42	10	23	36	4	17	30	43	11	24	37	5	18	31	44	12	25	38	6	19	32	45	7/90
8	17	34	6	23	40	12	29	1	18	35	7	24	41	13	30	2	19	36	8	25	42	14	31	3	20	37	9	26	43	15	32	4	21	38	10	27	44	16	33	5	22	39	11	28	45	8/90
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9/90
10	0	0	0	0	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	6	0	0	0	0	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	3	0	0	0	0	8	0	0	0	0	4	0	0	0	0	9	10/90
11	41	37	33	29	25	21	17	13	9	5	1	42	38	34	30	26	22	18	14	10	6	2	43	39	35	31	27	23	19	15	11	7	3	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	45	11/90
12	0	0	4	0	0	8	0	0	12	0	0	1	0	0	5	0	0	9	0	0	13	0	0	2	0	0	6	0	0	10	0	0	14	0	0	3	0	0	7	0	0	11	0	0	15	12/90
13	7	14	21	28	35	42	4	11	18	25	32	39	1	8	15	22	29	36	43	5	12	19	26	33	40	2	9	16	23	30	37	44	6	13	20	27	34	41	3	10	17	24	31	38	45	13/90
14	29	13	42	26	10	39	23	7	36	20	4	33	17	1	30	14	43	27	11	40	24	8	37	21	5	34	18	2	31	15	44	28	12	41	25	9	38	22	6	35	19	3	32	16	45	14/90
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	15/90
16	31	17	3	34	20	6	37	23	9	40	26	12	43	29	15	1	32	18	4	35	21	7	38	24	10	41	27	13	44	30	16	2	33	19	5	36	22	8	39	25	11	42	28	14	45	16/90
17	8	16	24	32	40	3	11	19	27	35	43	6	14	22	30	38	1	9	17	25	33	41	4	12	20	28	36	44	7	15	23	31	39	2	10	18	26	34	42	5	13	21	29	37	45	17/90
18	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5	18/90
19	19	38	12	31	5	24	43	17	36	10	29	3	22	41	15	34	8	27	1	20	39	13	32	6	25	44	18	37	11	30	4	23	42	16	35	9	28	2	21	40	14	33	7	26	45	19/90
20	0	0	0	0	7	0	0	0	0	5	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	8	0	0	0	0	6	0	0	0	0	4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	9	20/90
21	0	0	13	0	0	11	0	0	9	0	0	7	0	0	5	0	0	3	0	0	1	0	0	14	0	0	12	0	0	10	0	0	8	0	0	6	0	0	4	0	0	2	0	0	15	21/90
22	43	41	39	37	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	44	42	40	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	45	22/90

Tablica 45/1



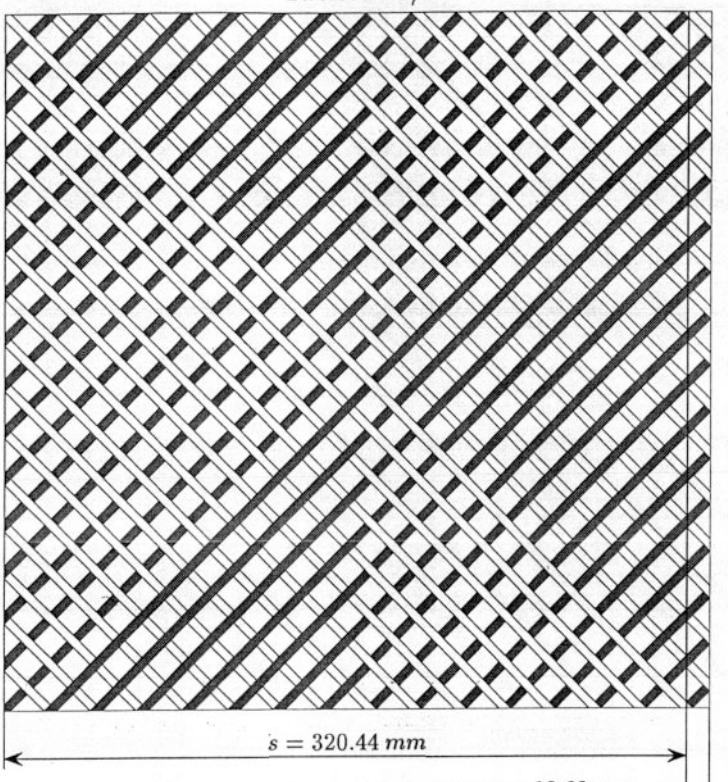
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/2



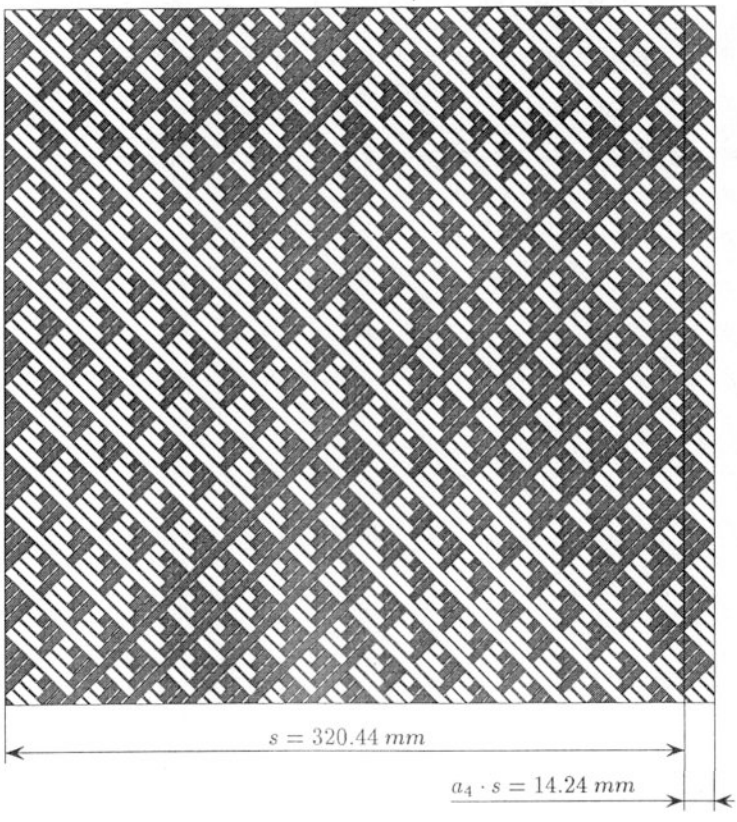
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/3



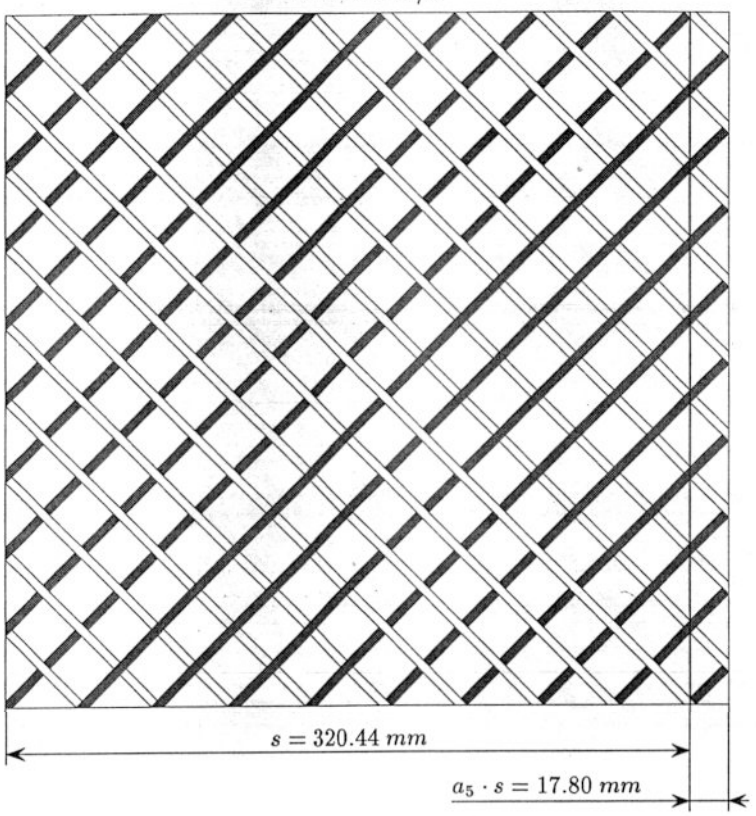
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 45/4



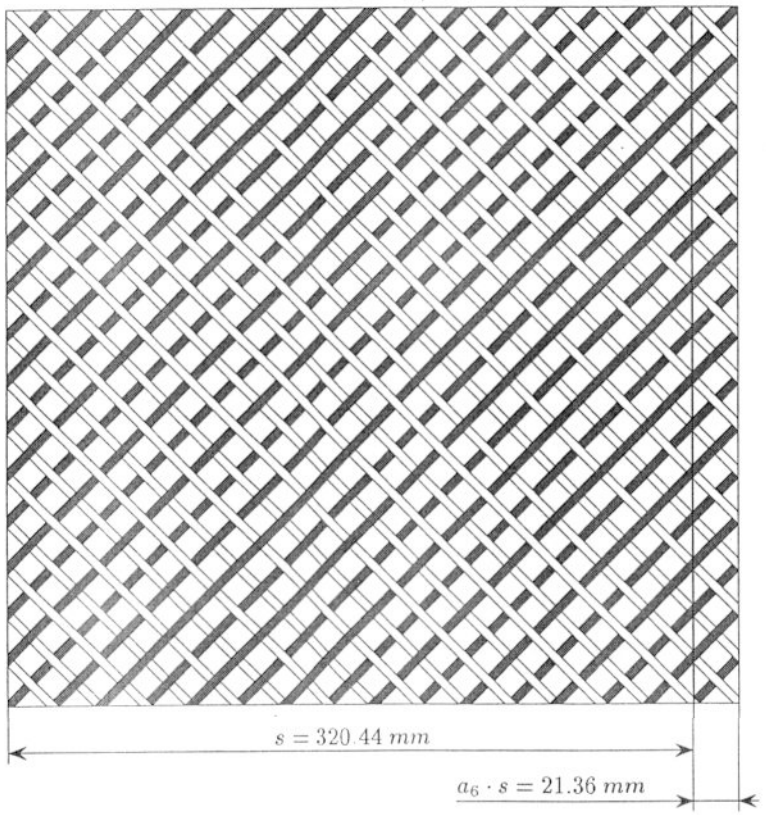
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 45/5



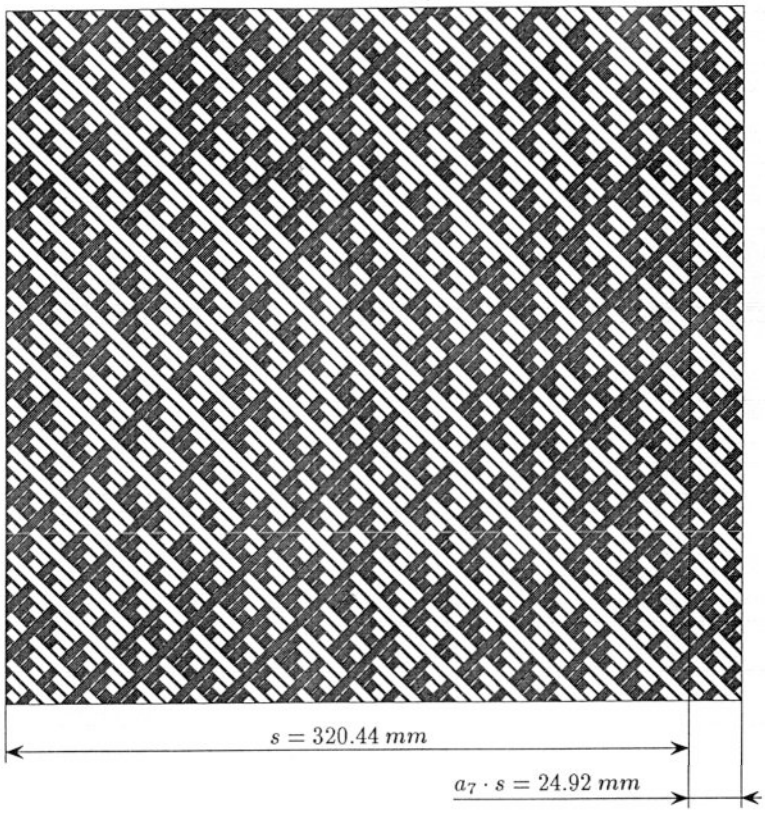
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/6



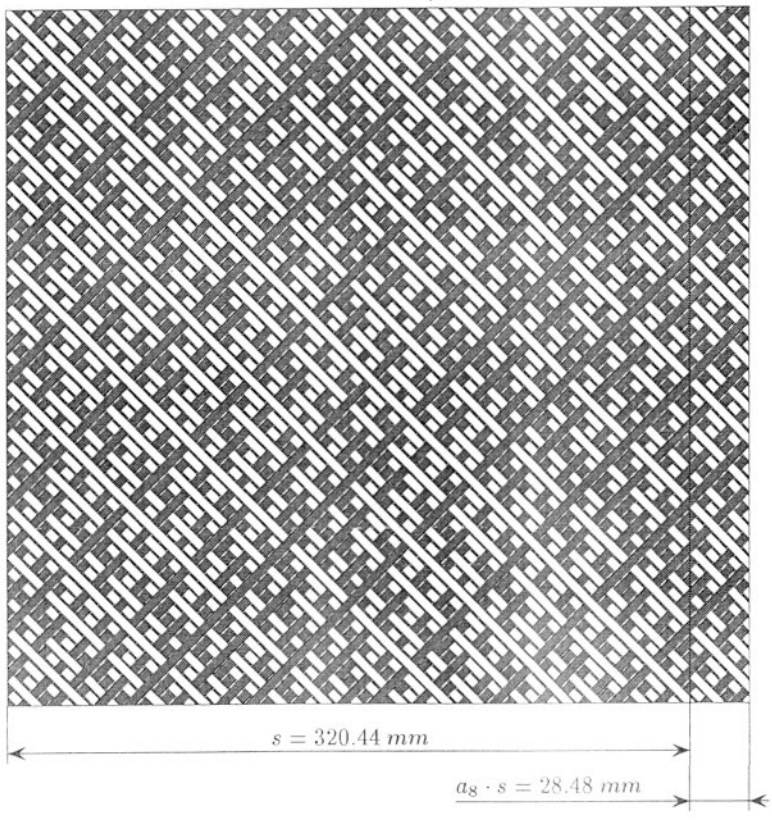
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/7



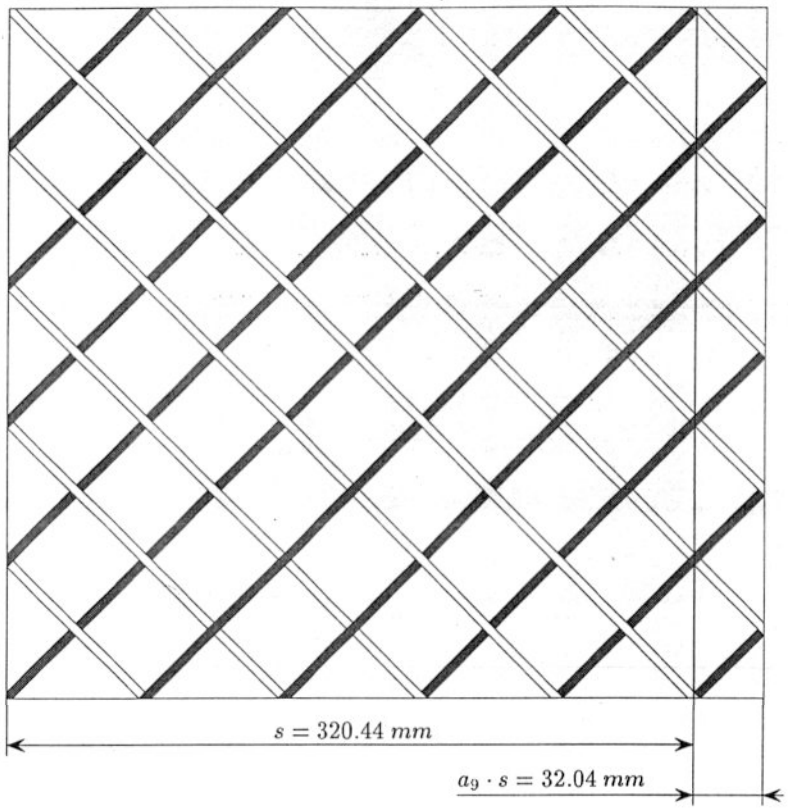
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/8



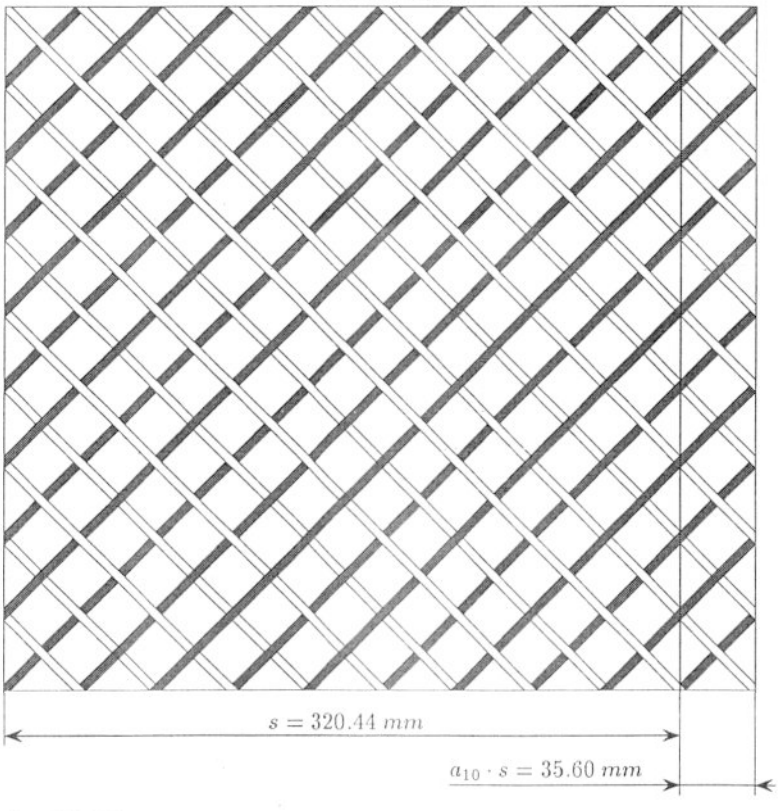
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/9



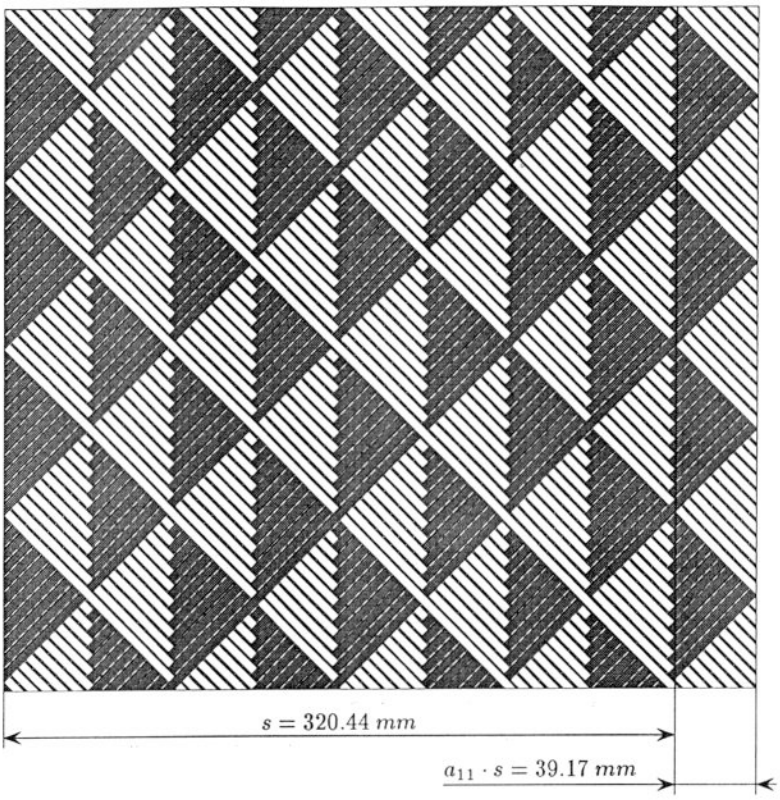
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/10



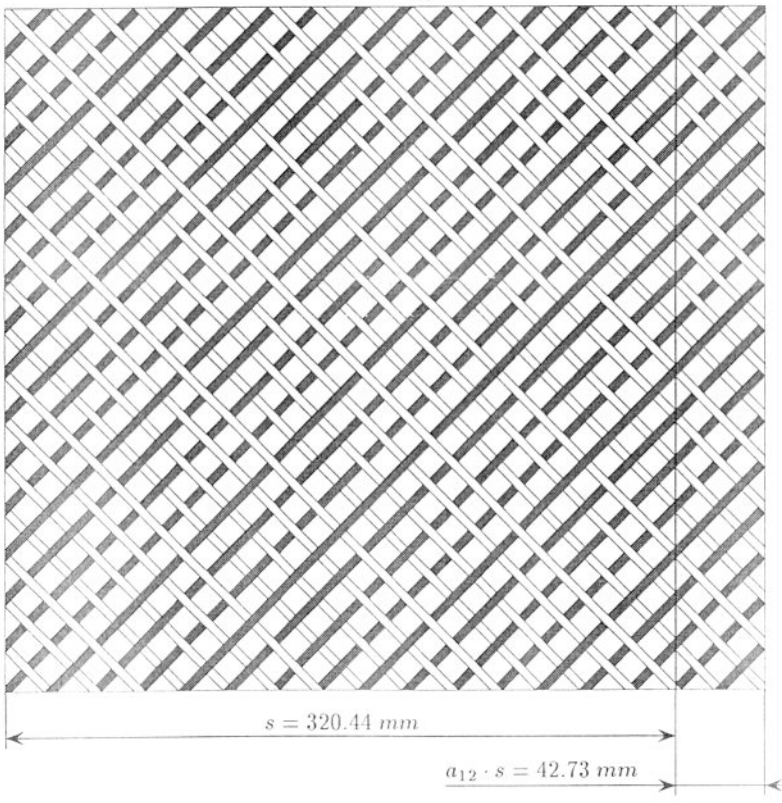
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/11



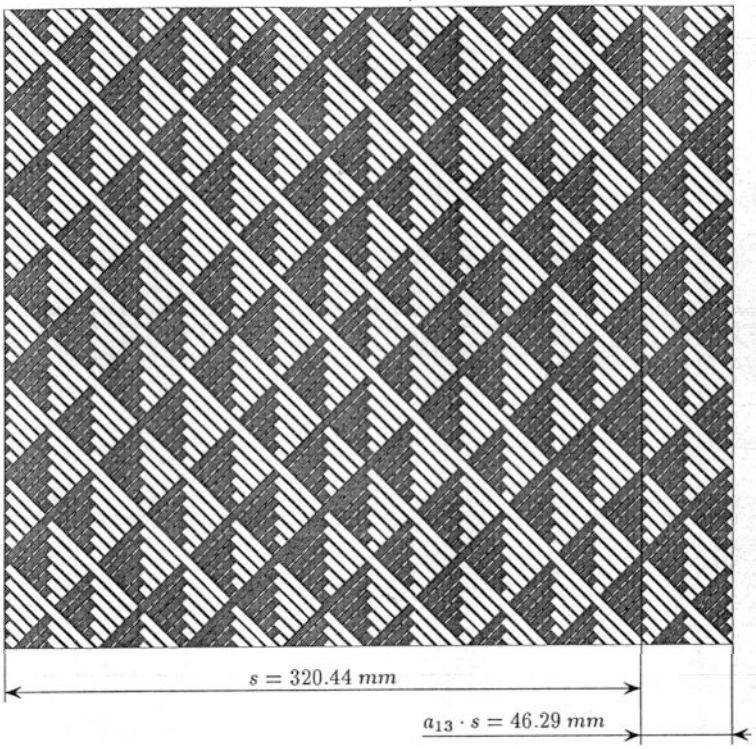
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/12



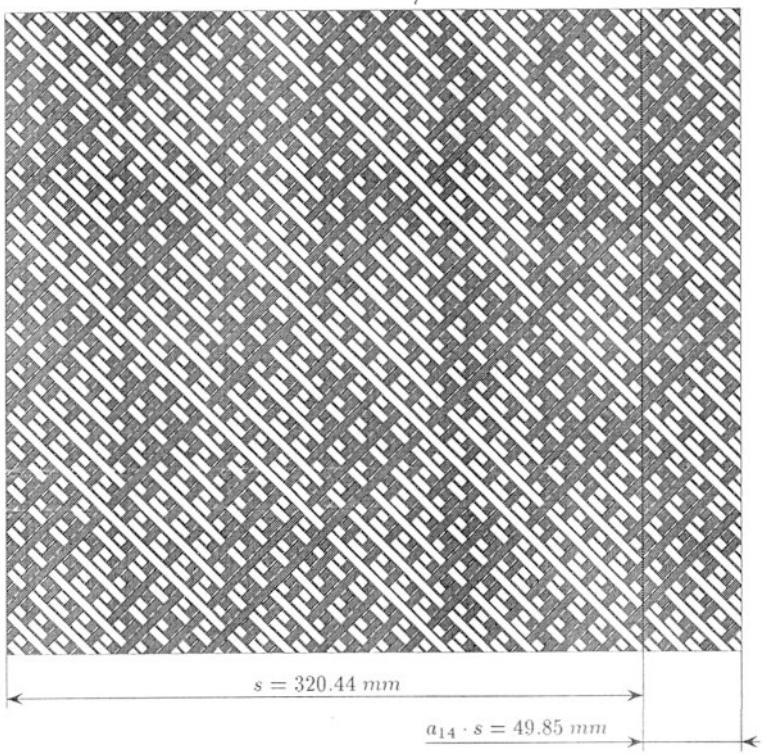
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/13



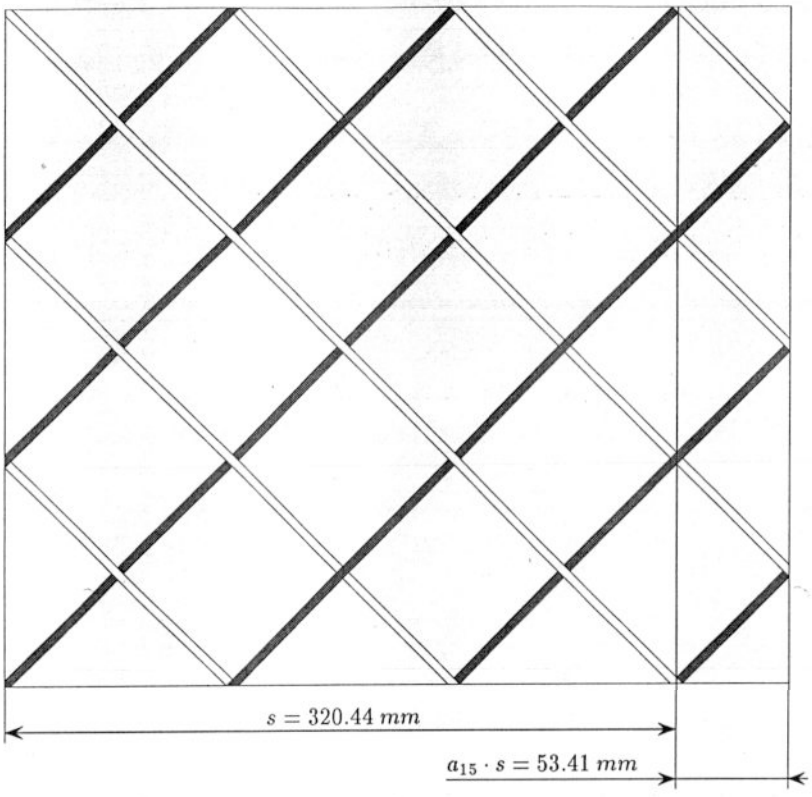
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/14



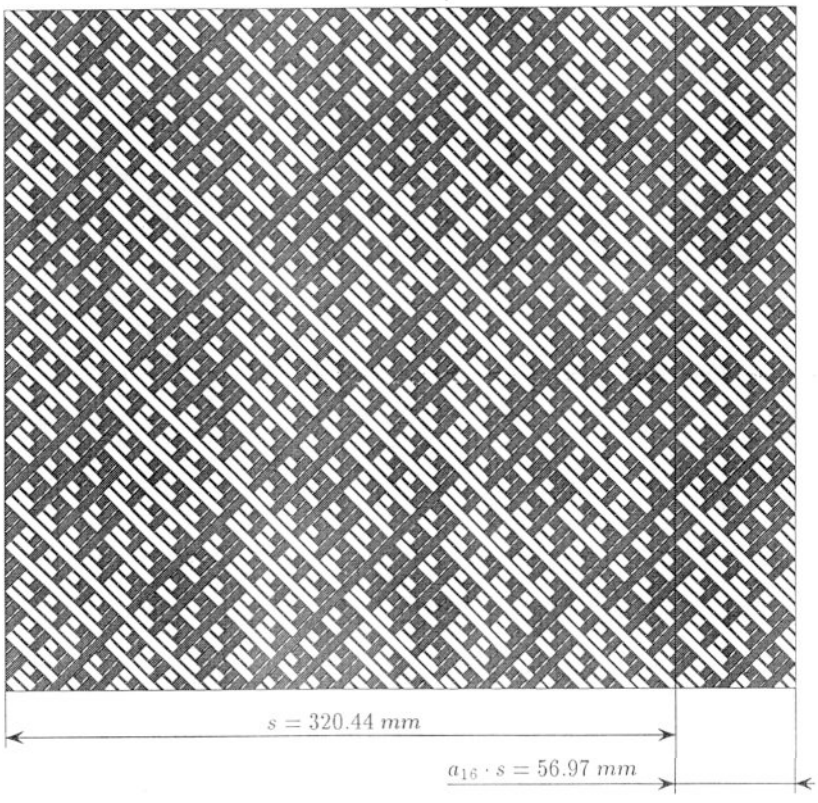
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/15



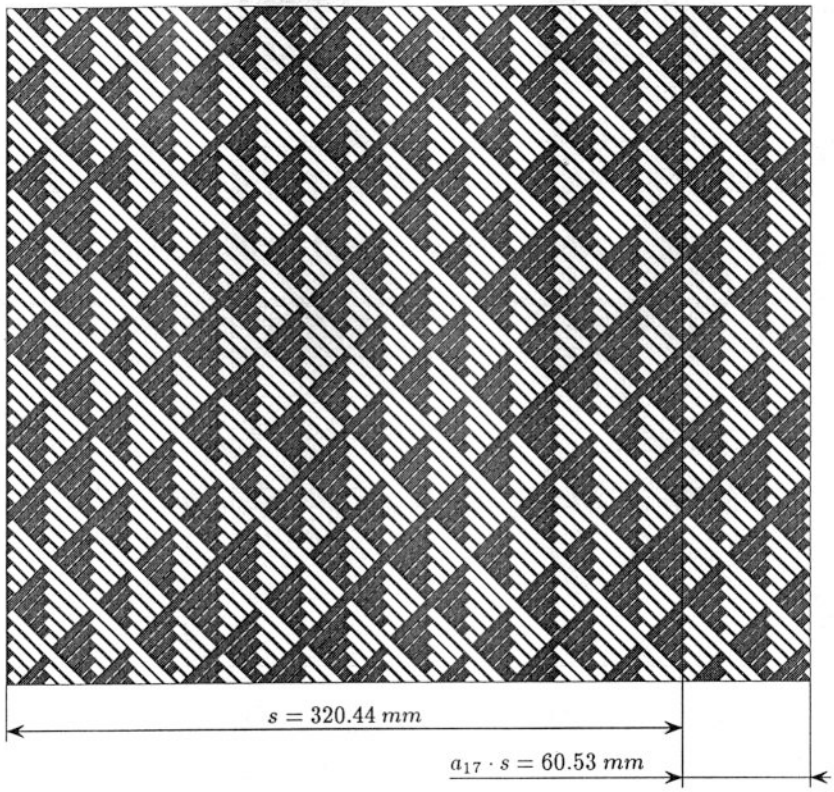
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/16



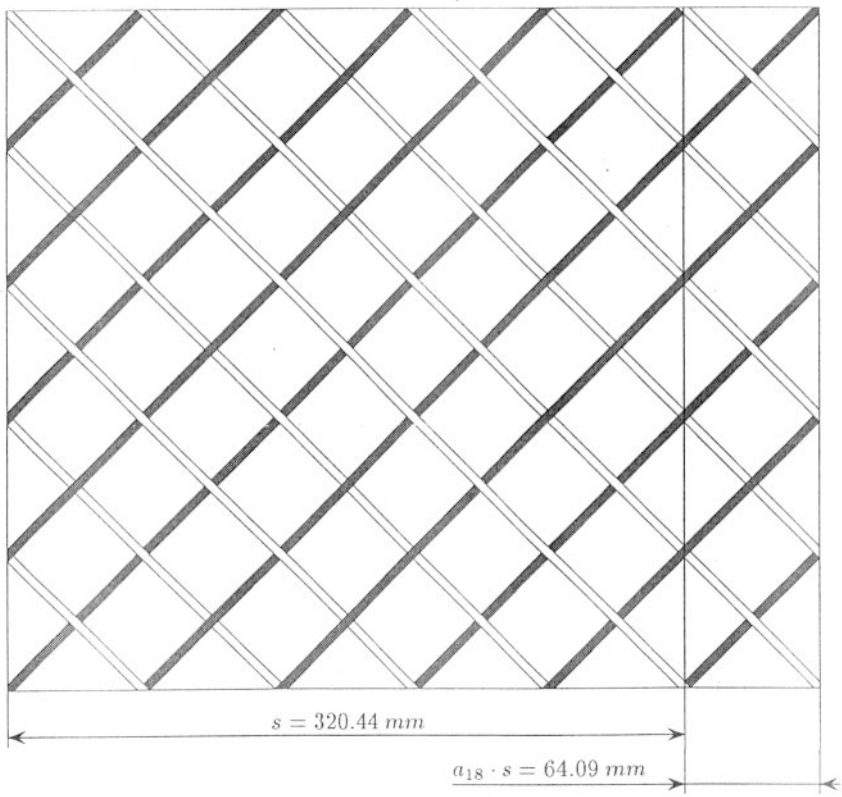
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/17



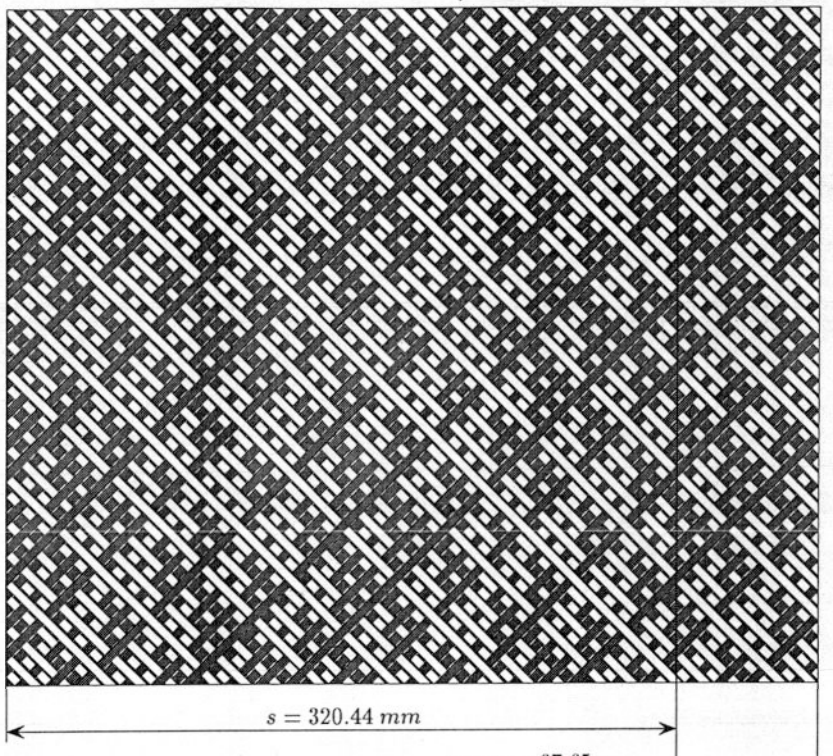
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/18



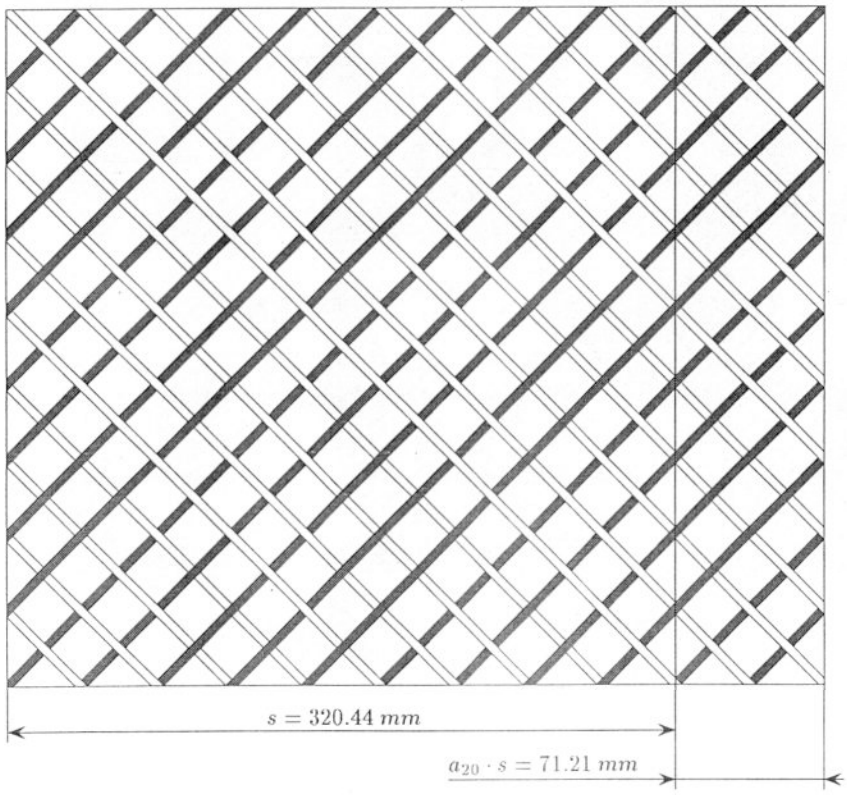
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/19



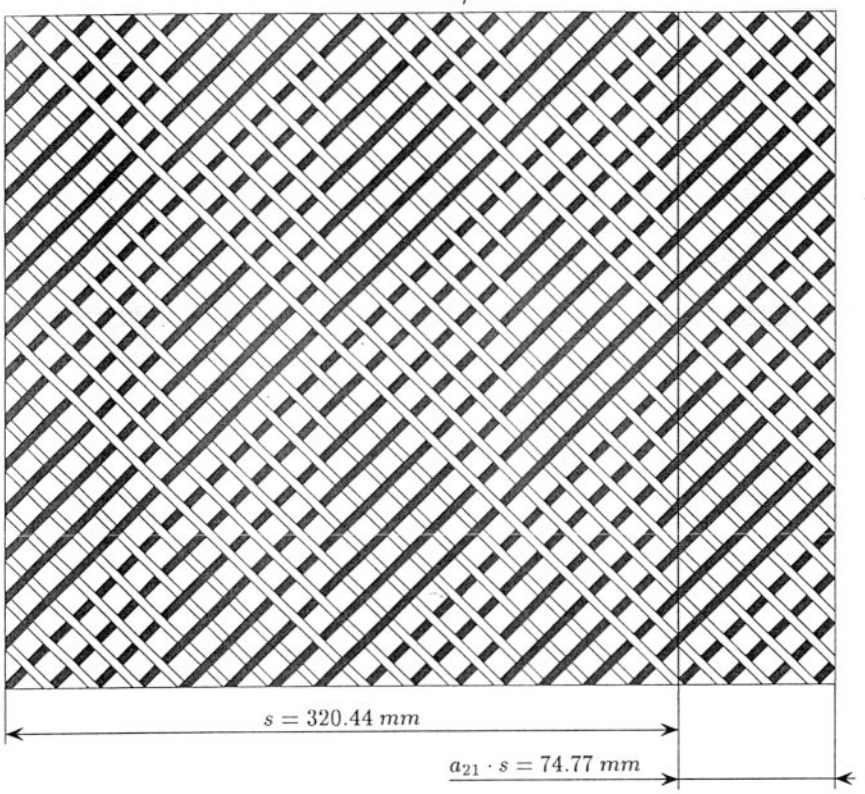
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/20



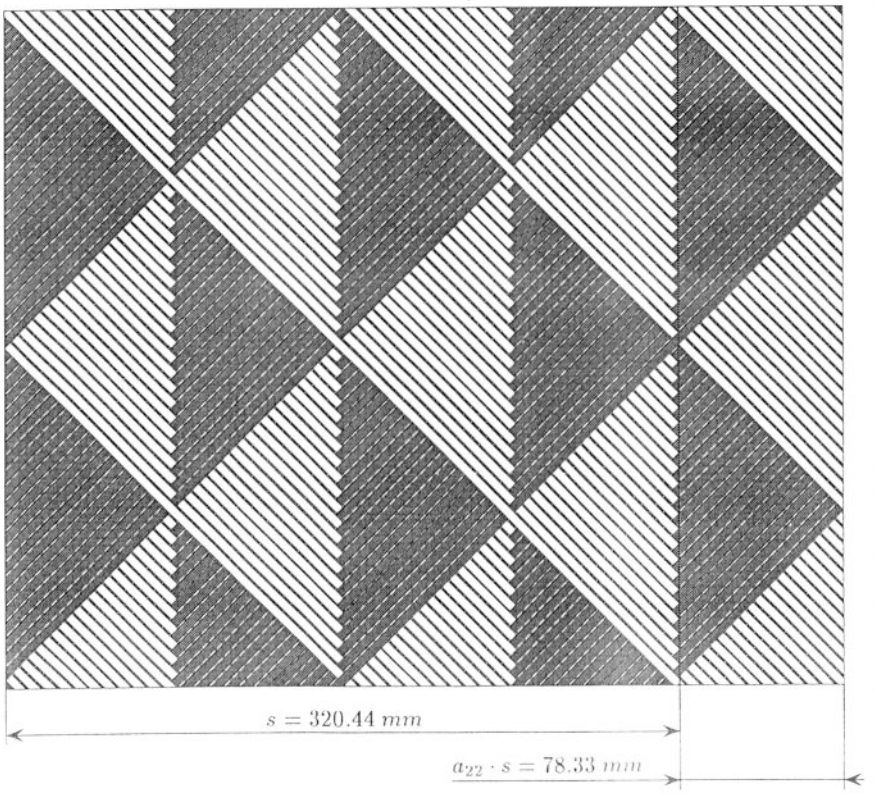
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 45/21



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

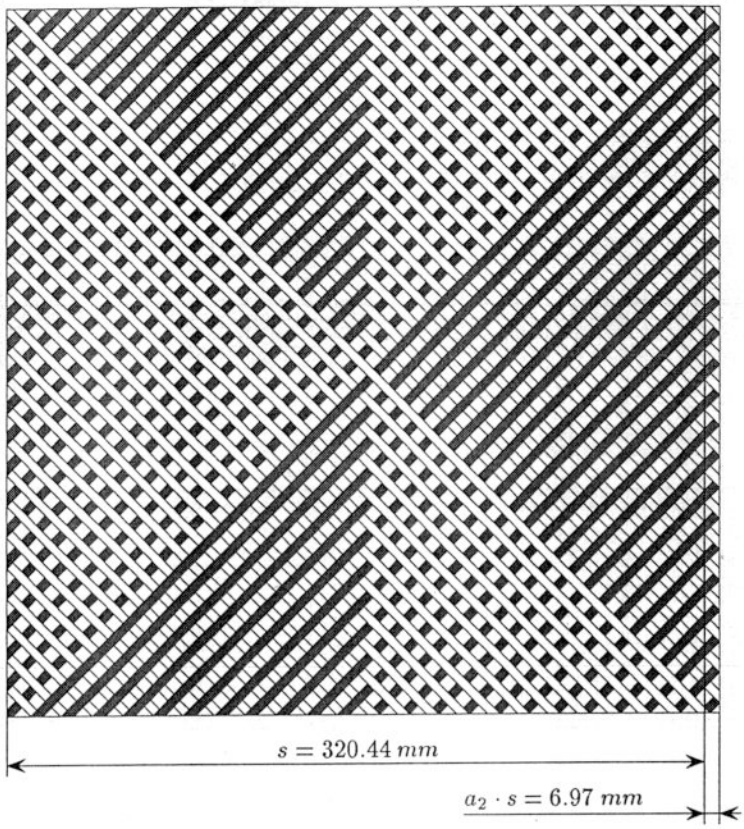
Tablica 45/22



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

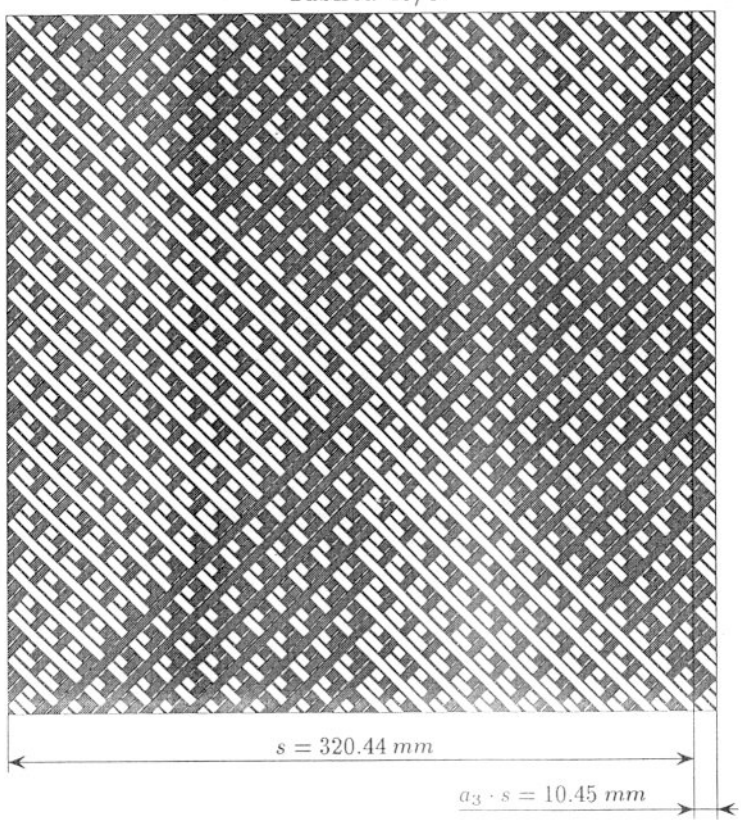
| Liczba wiązek rowingu: 46 | | |

Tablica 46/2



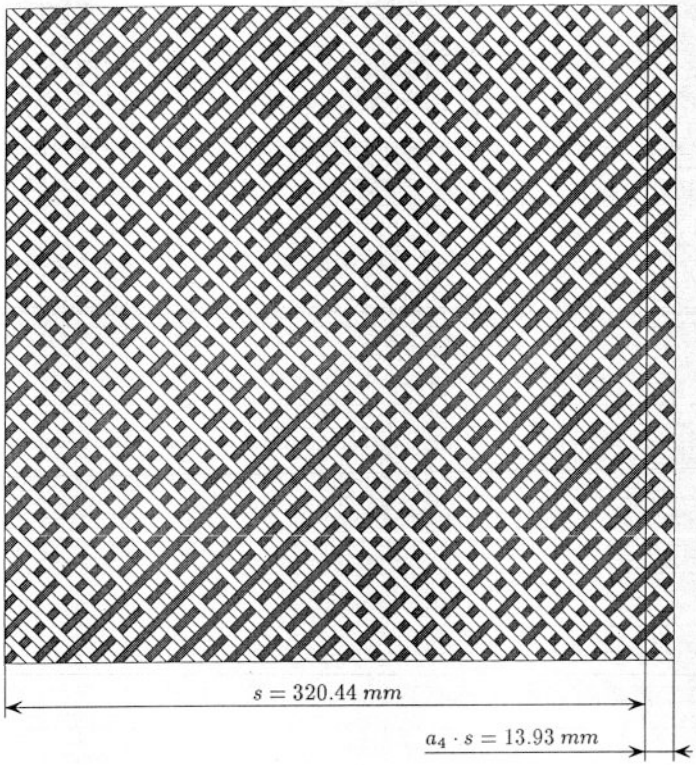
$d = 102.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/3



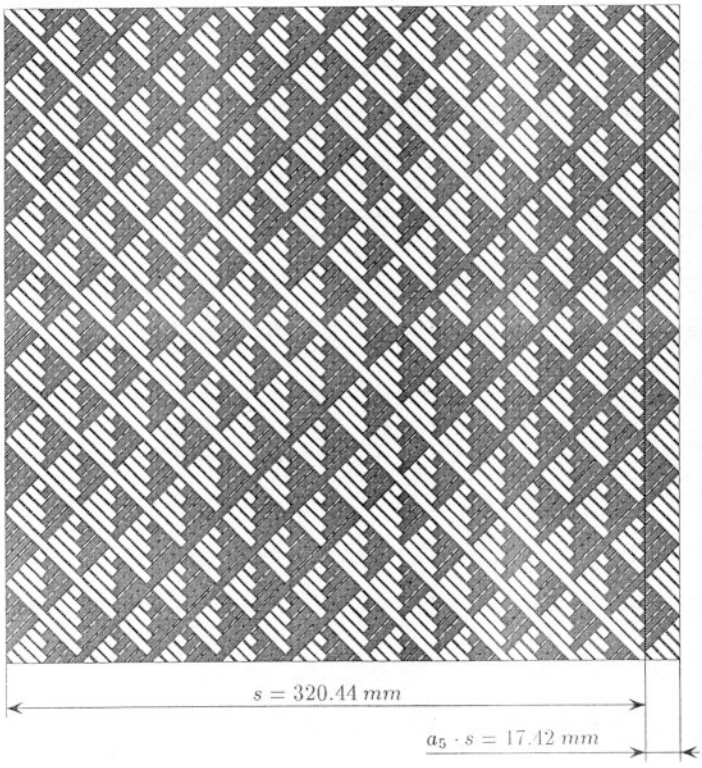
$d = 102.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/4



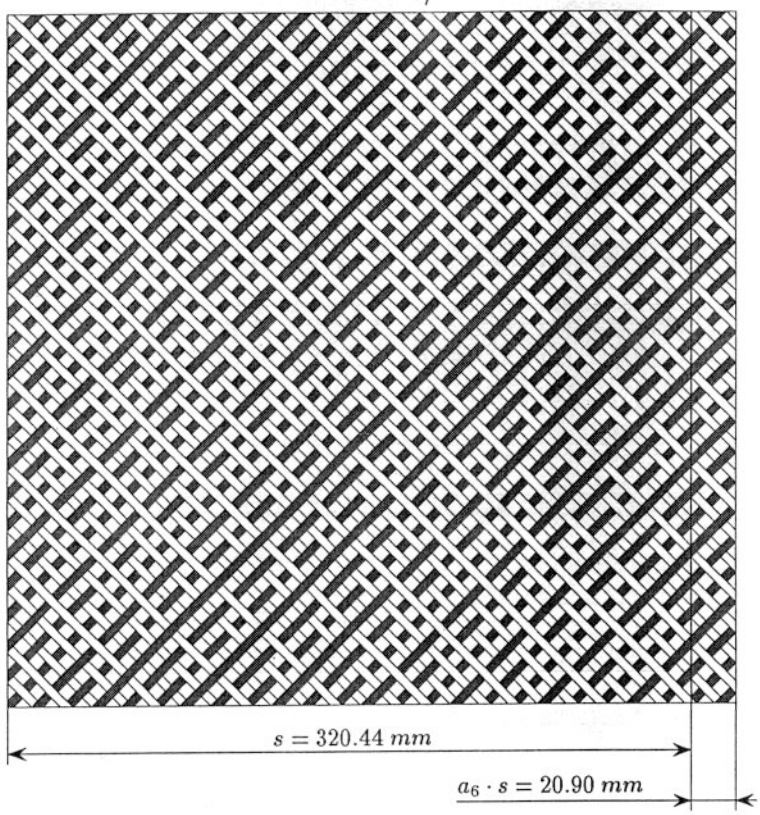
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/5



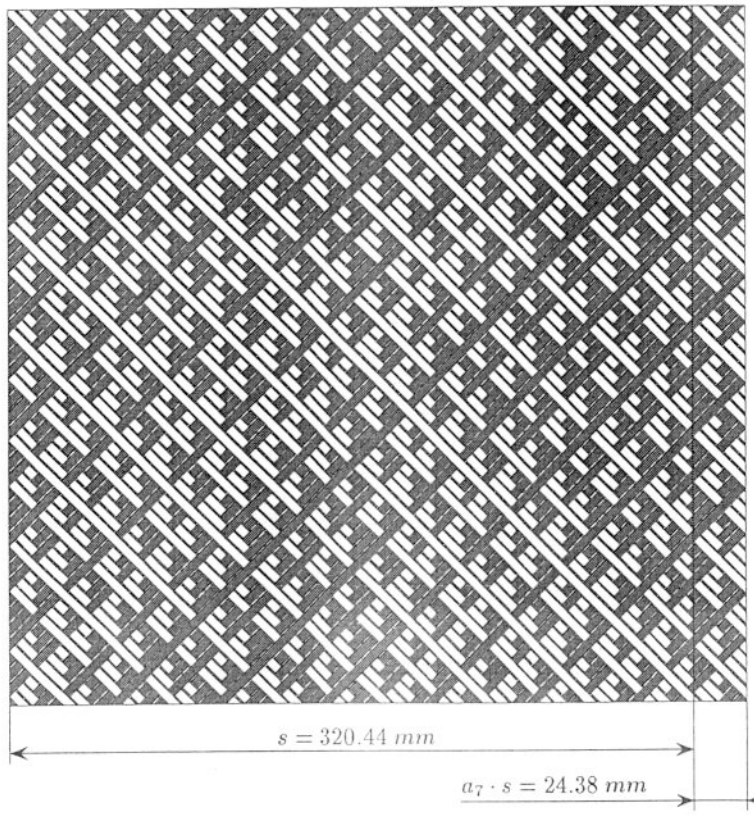
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/6



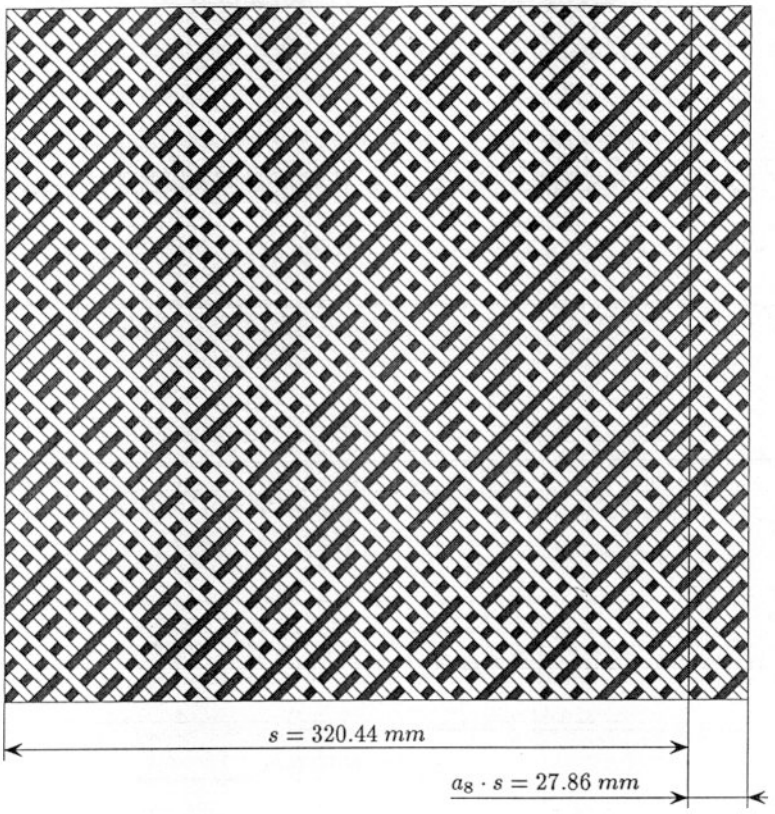
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/7



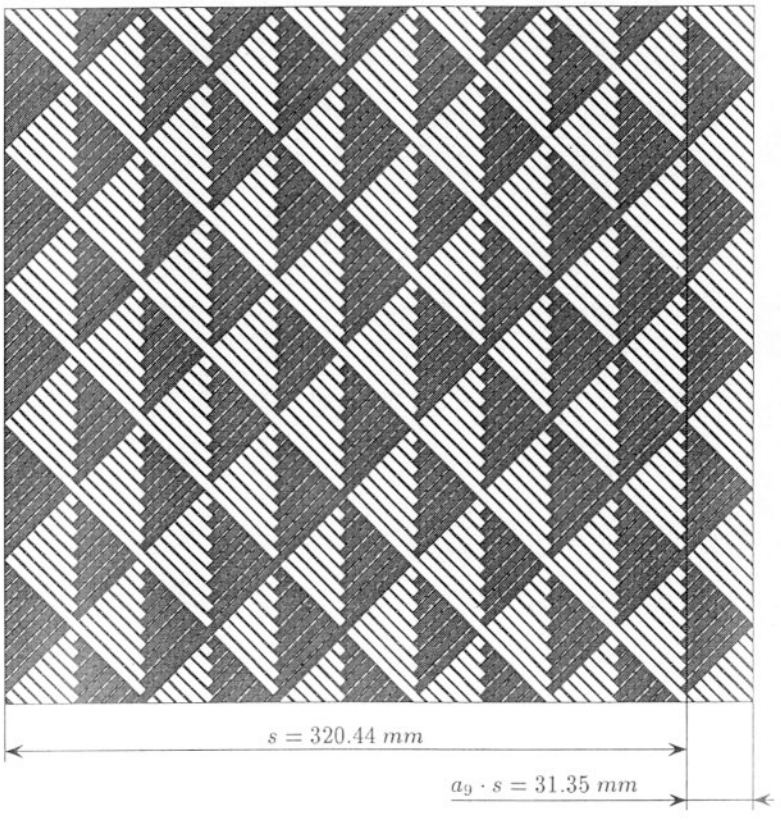
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/8



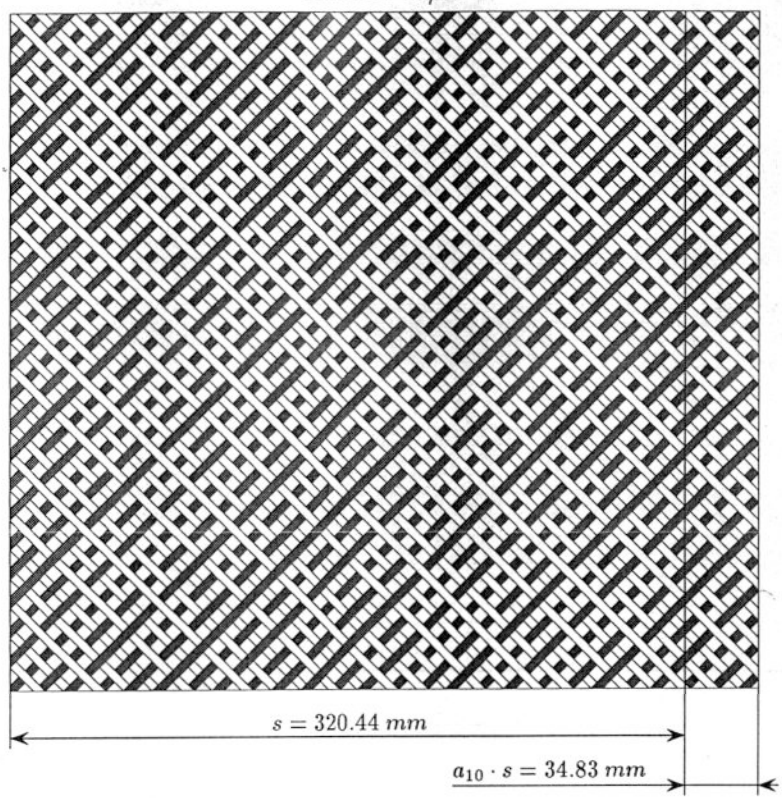
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/9



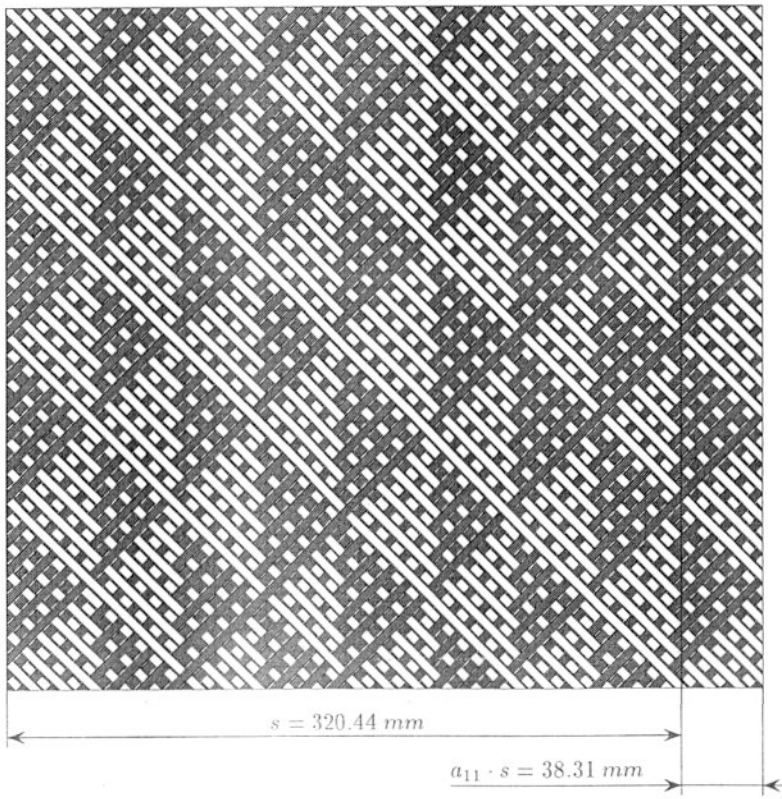
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/10



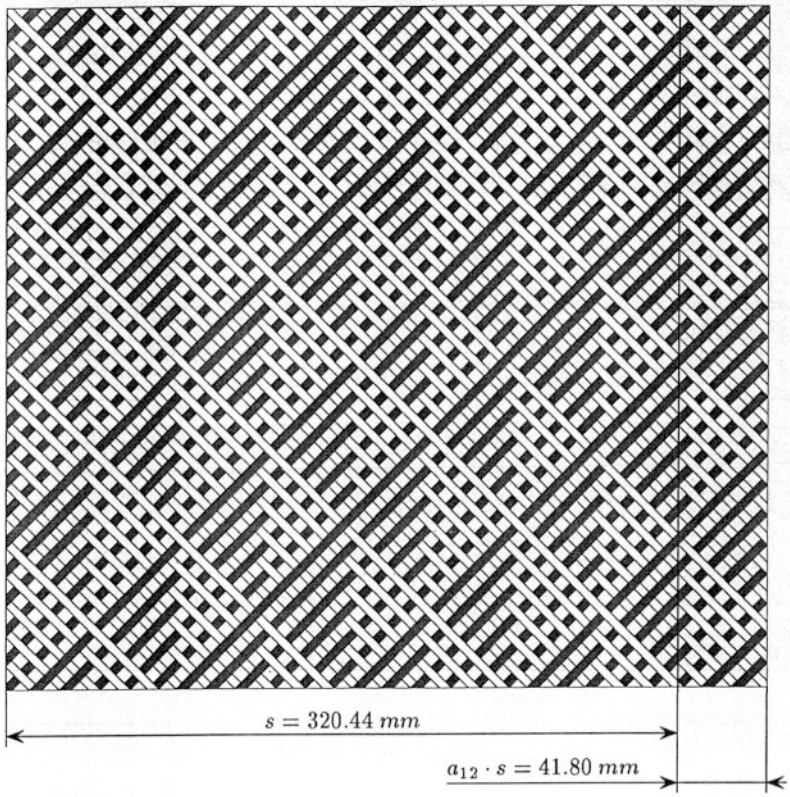
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/11



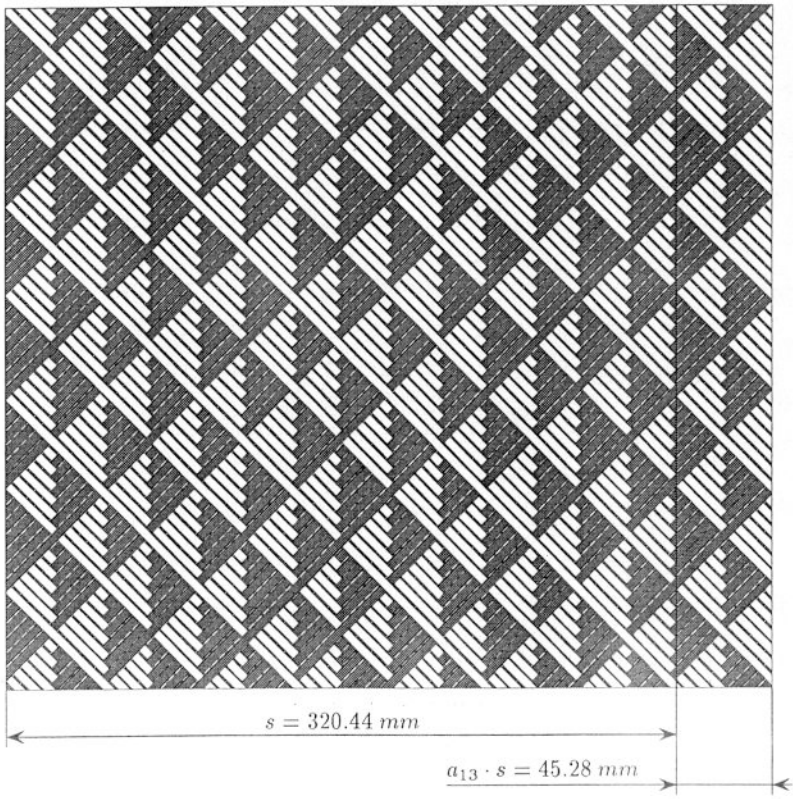
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/12



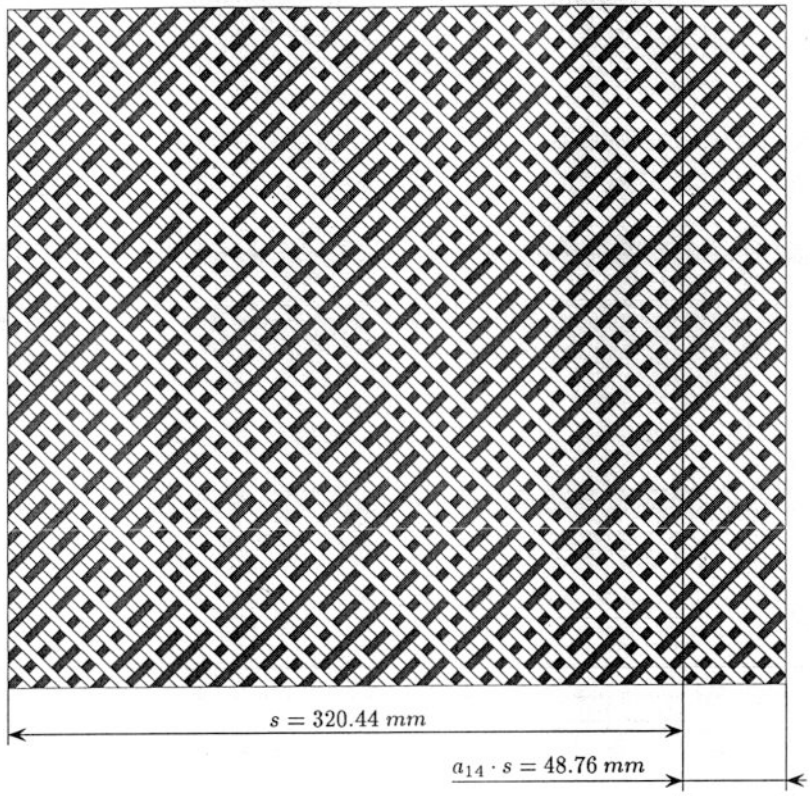
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/13



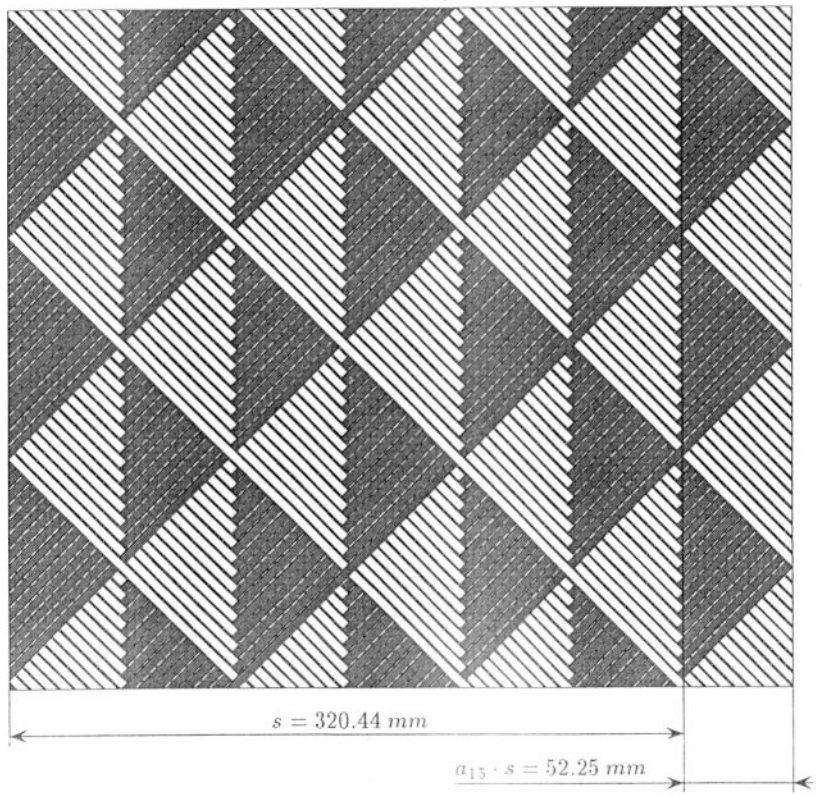
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/14



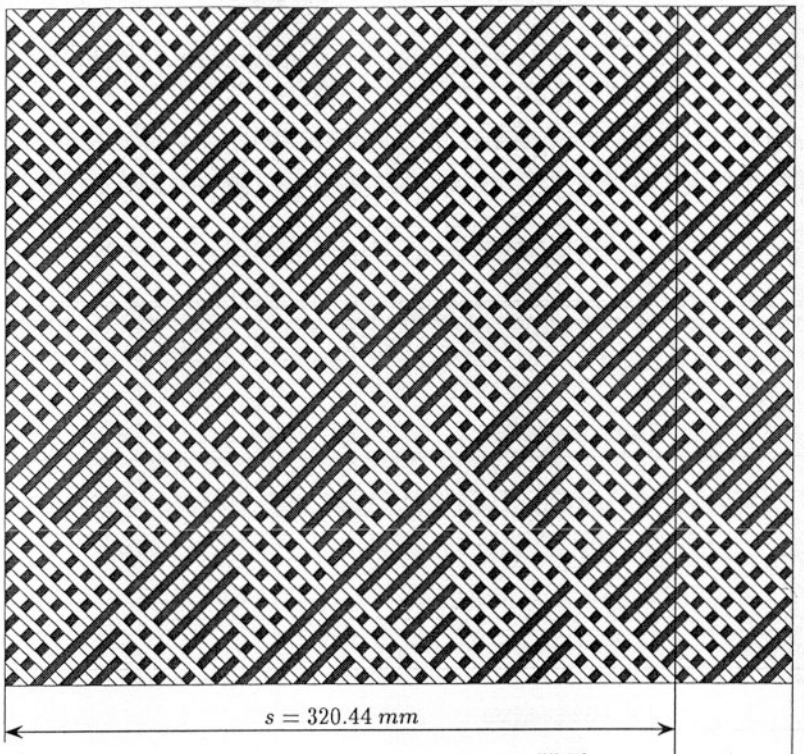
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/15



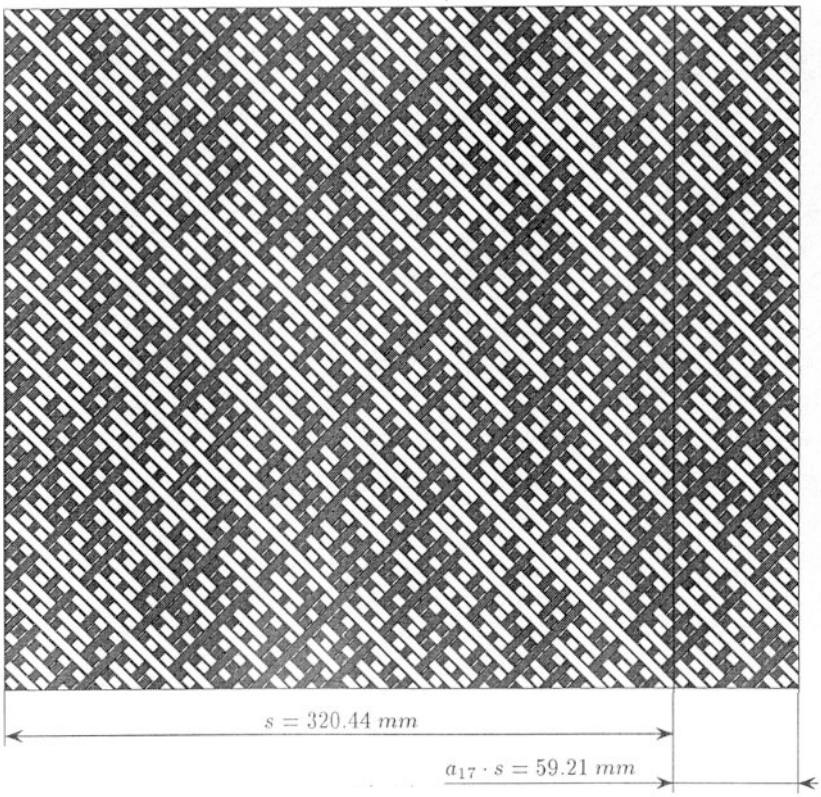
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/16



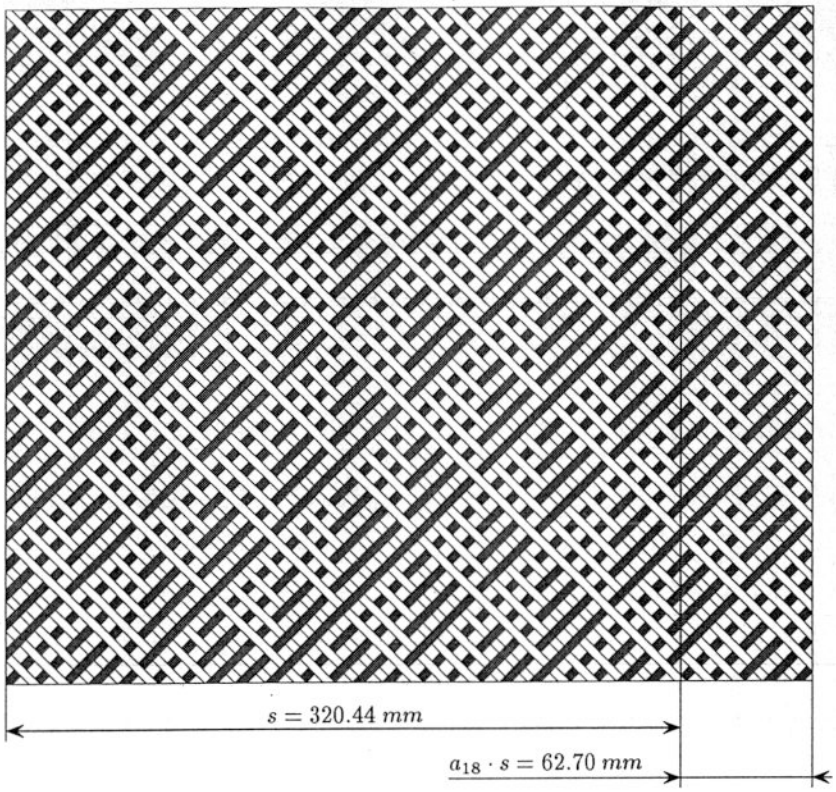
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/17



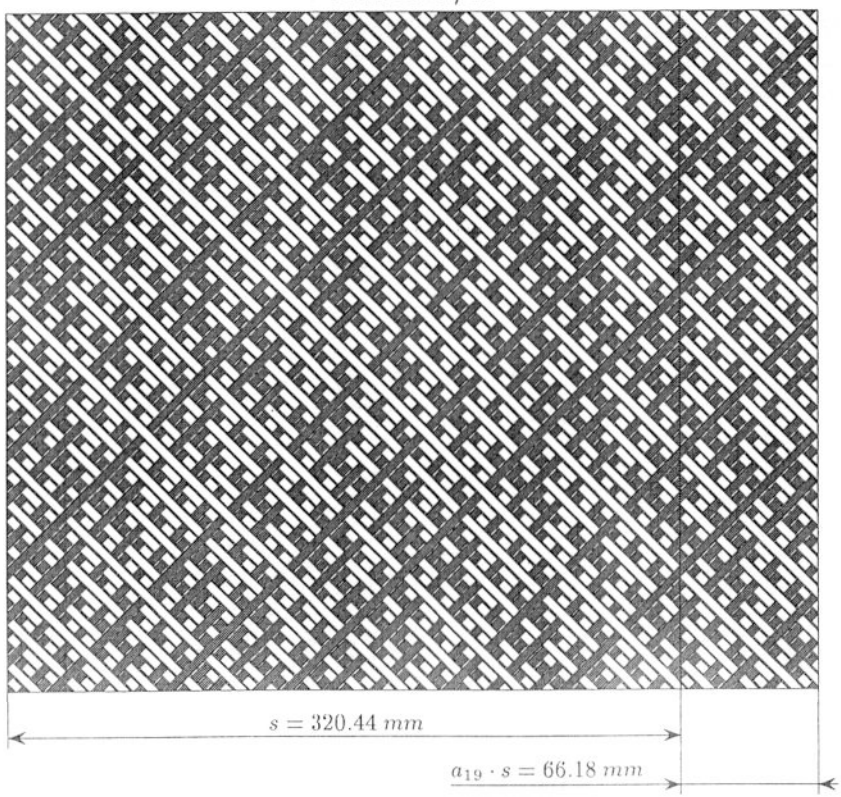
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/18



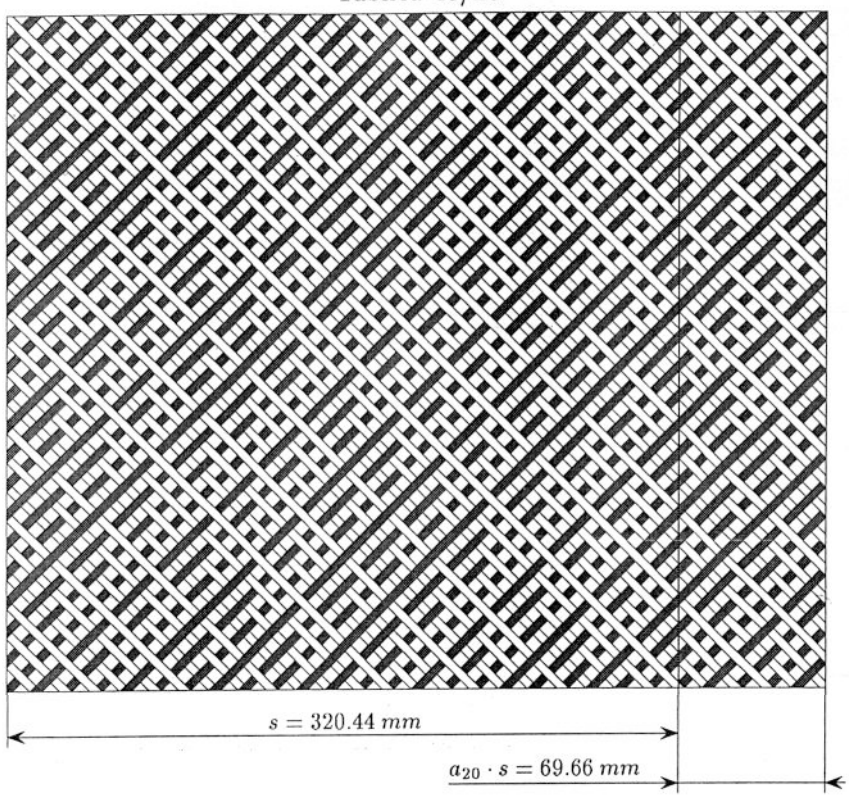
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/19



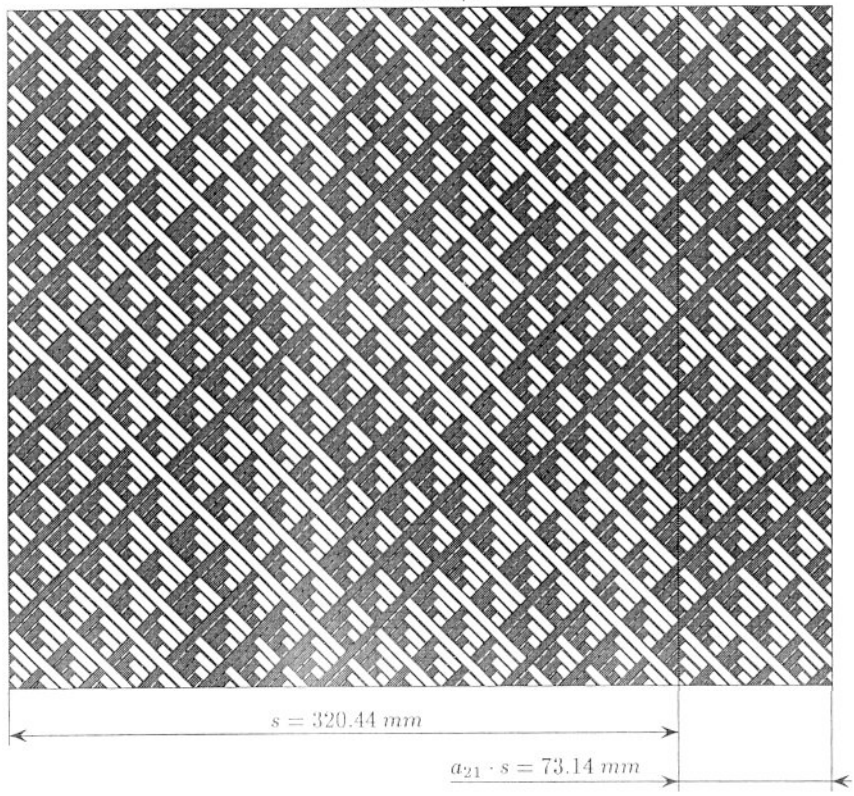
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/20



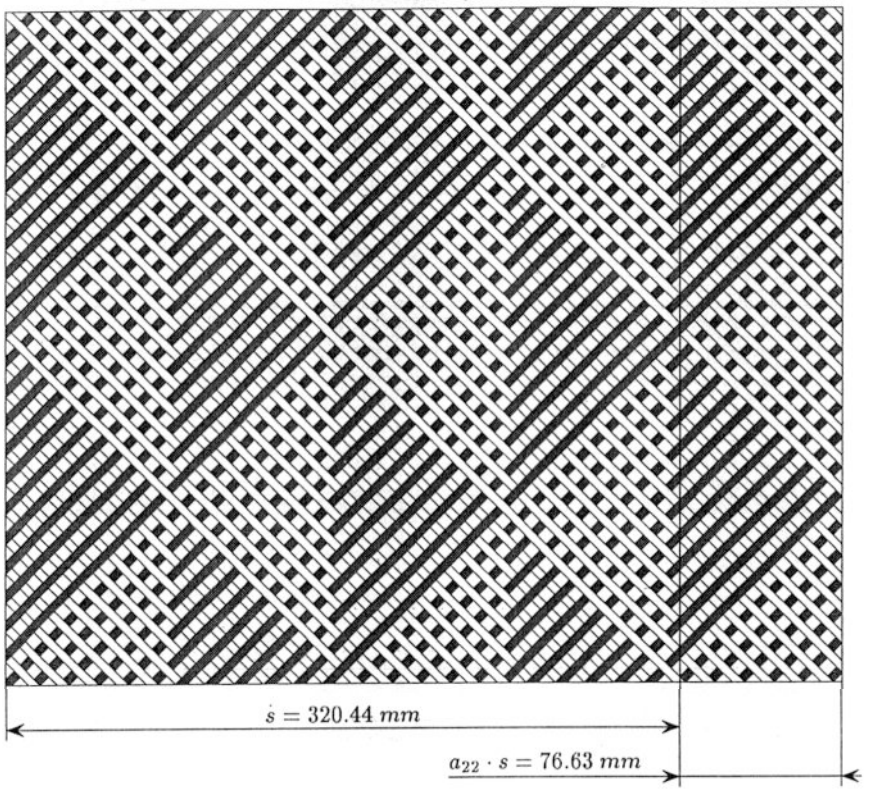
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/21



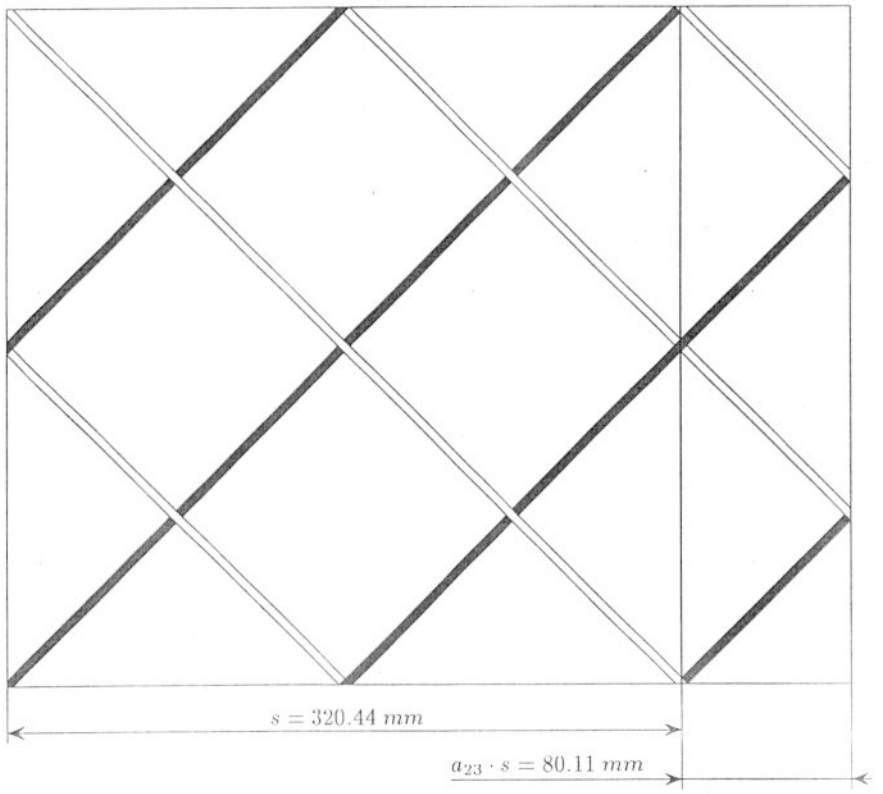
$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 46/22



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

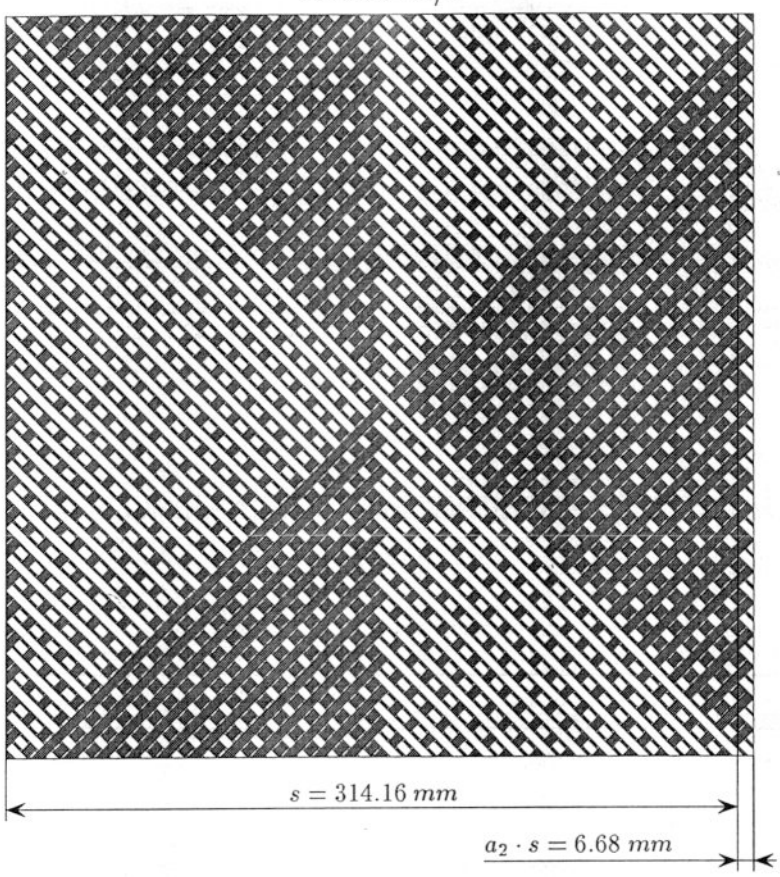
Tablica 46/23



$d = 102.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

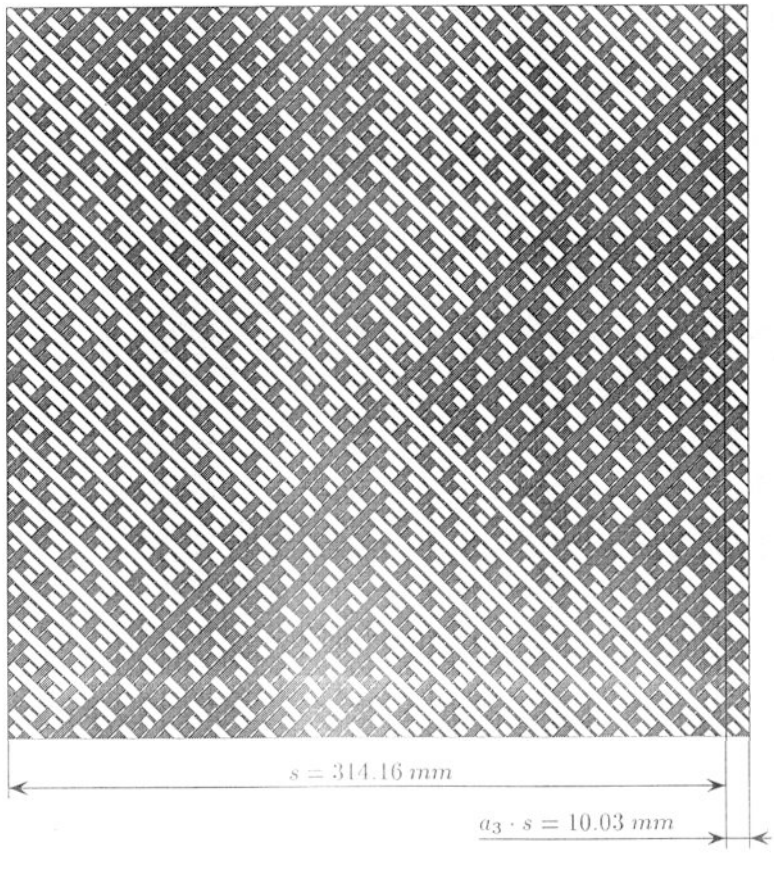
| Liczba wiązek rowingu: 47 | | |

Tablica 47/2



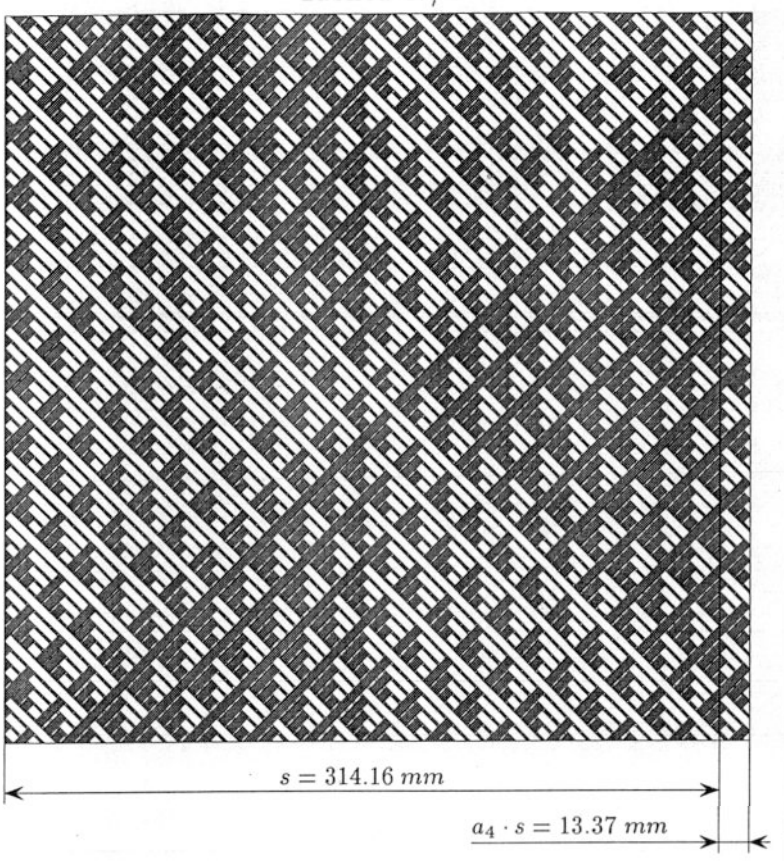
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/3



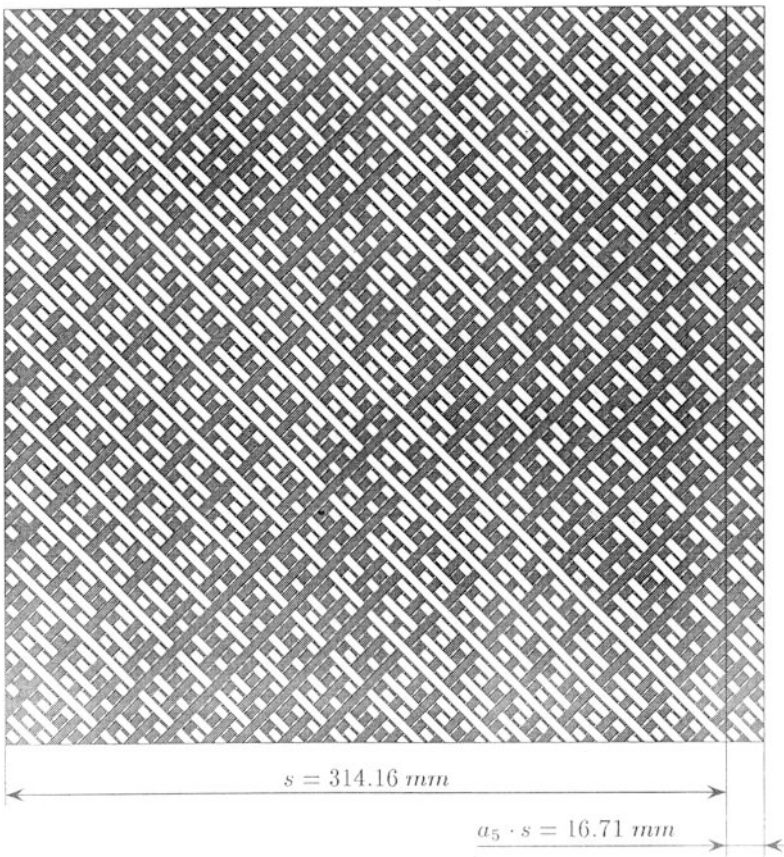
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/4



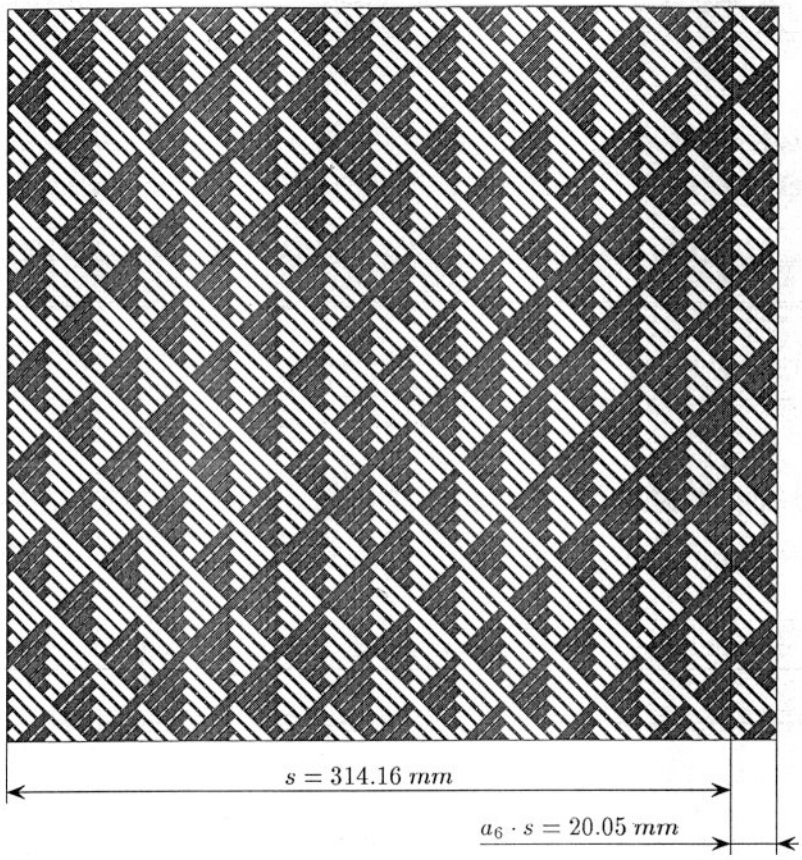
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/5



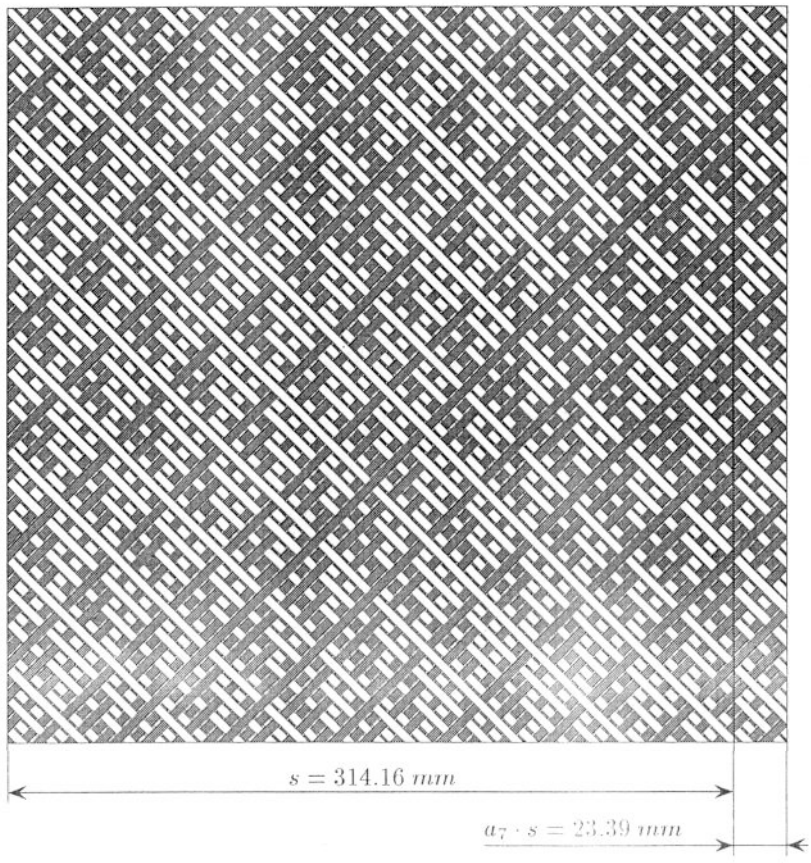
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/6



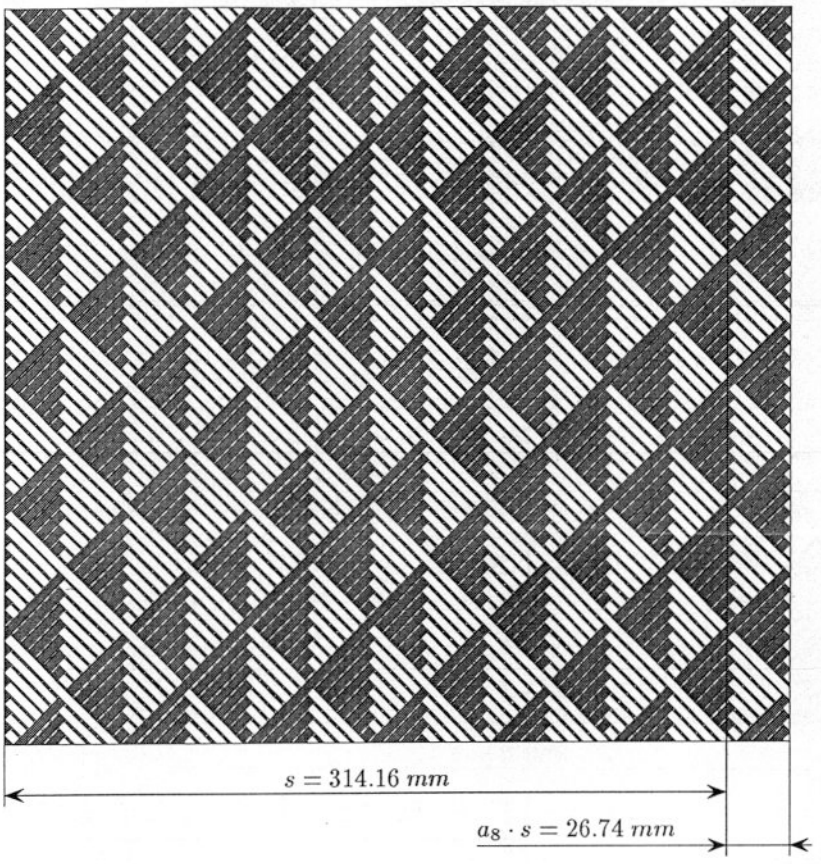
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/7



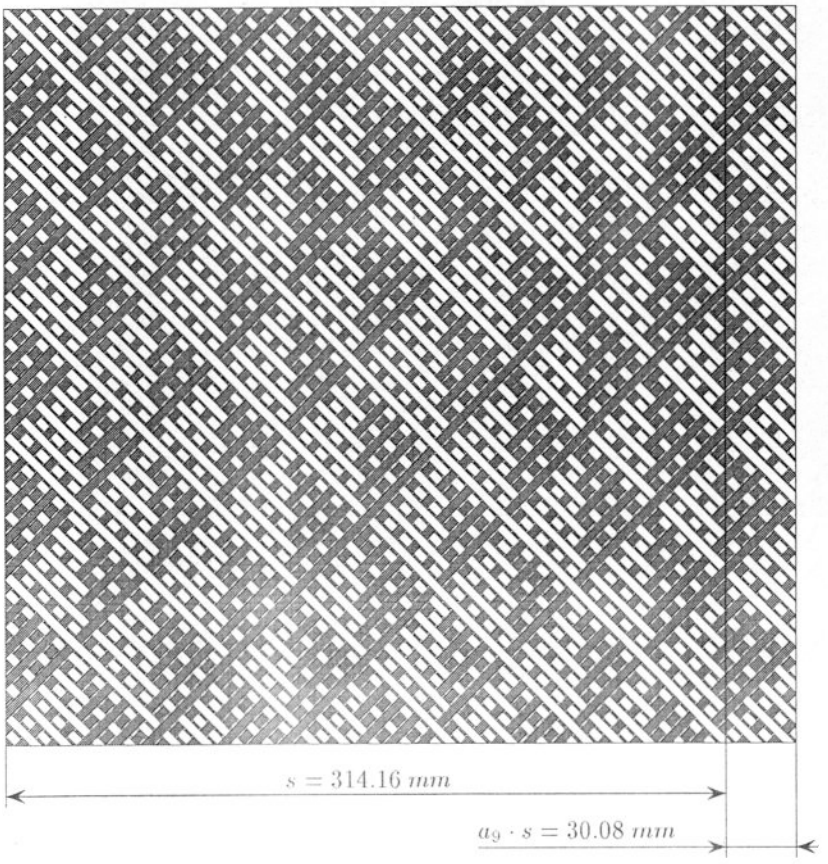
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/8



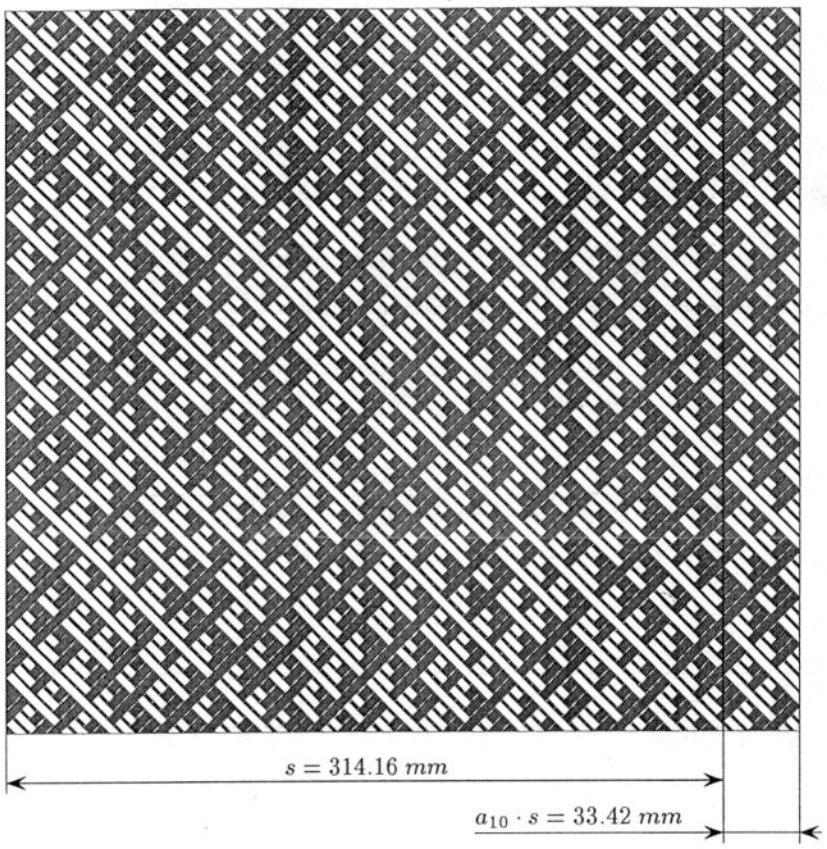
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/9



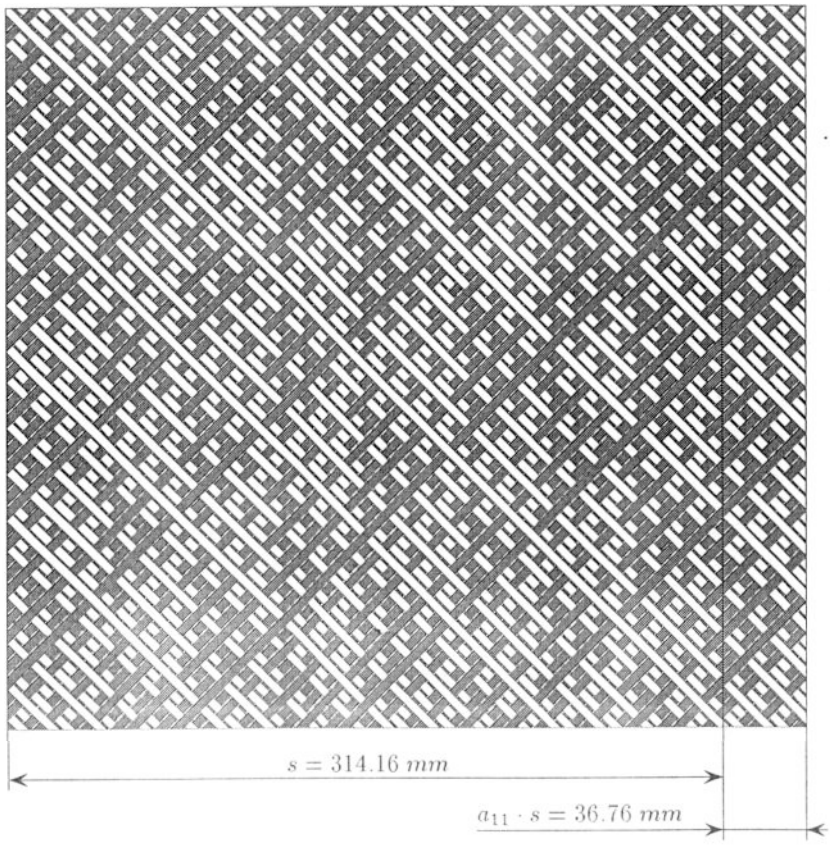
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/10



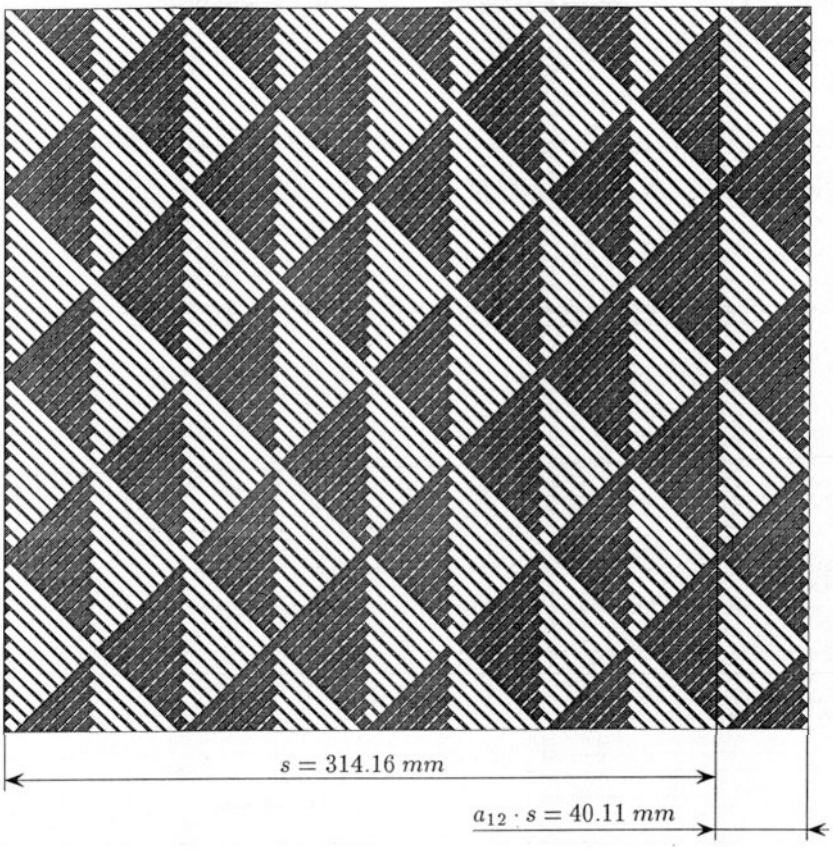
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/11



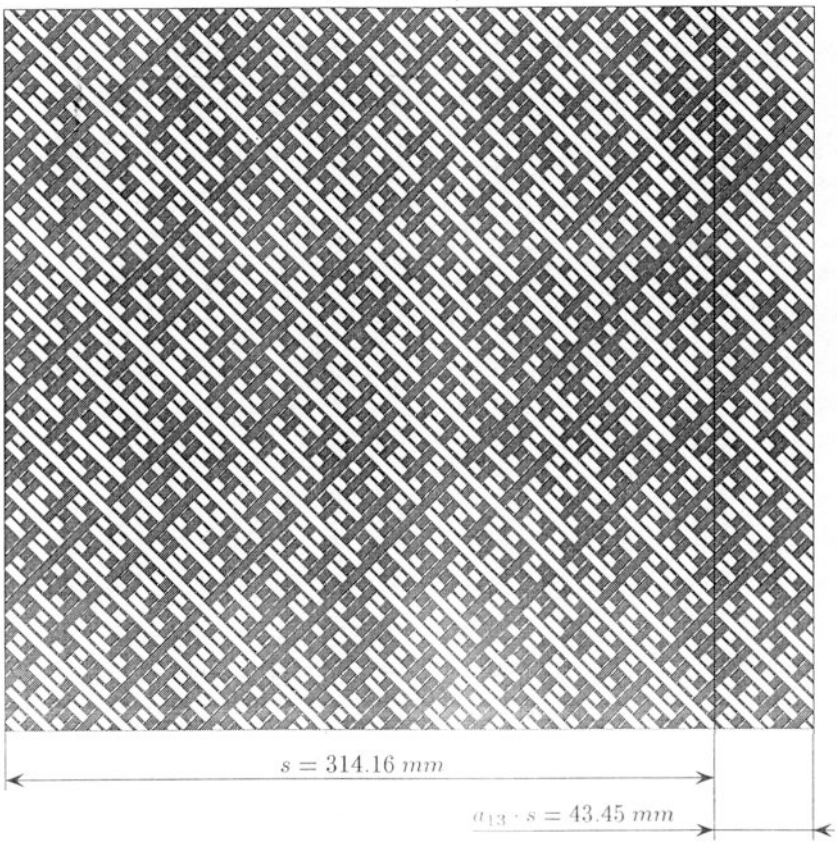
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/12



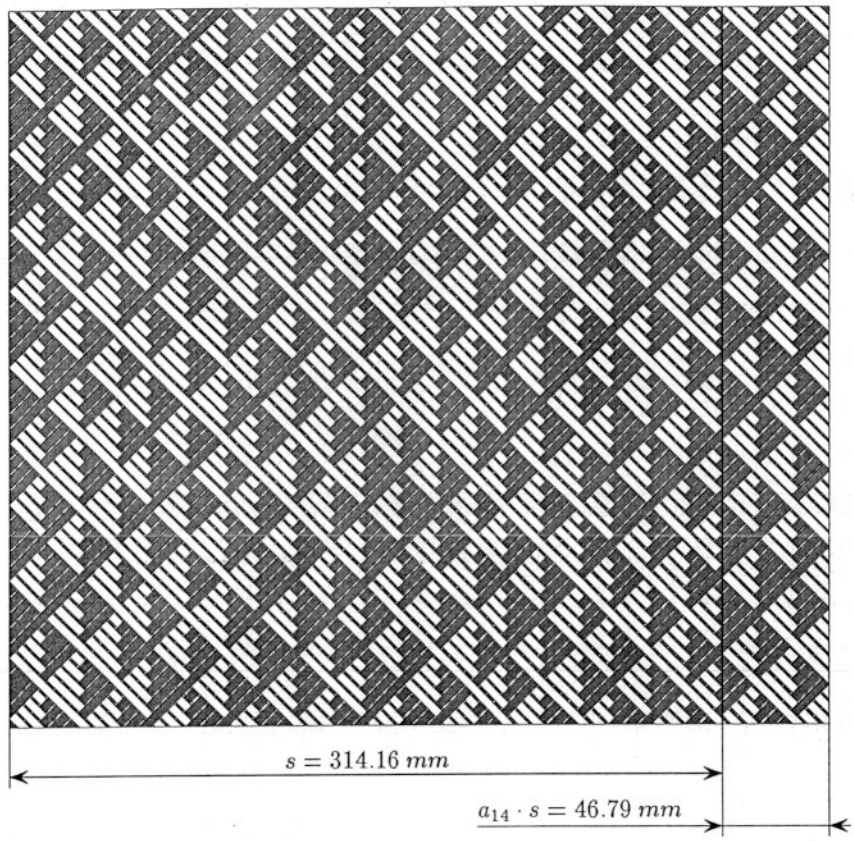
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/13



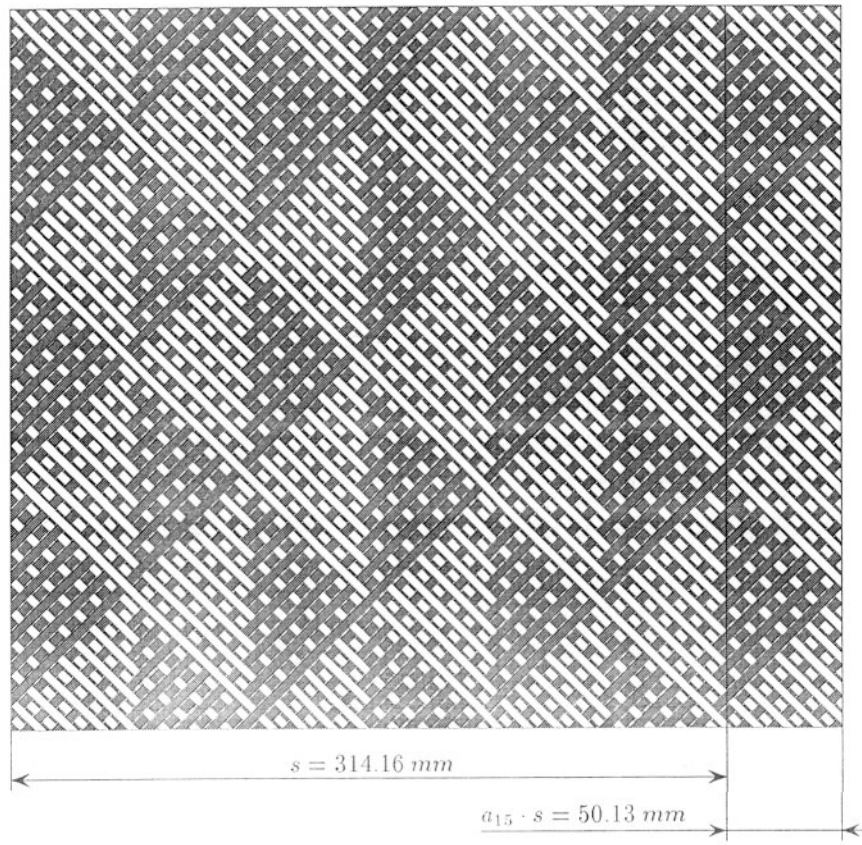
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/14



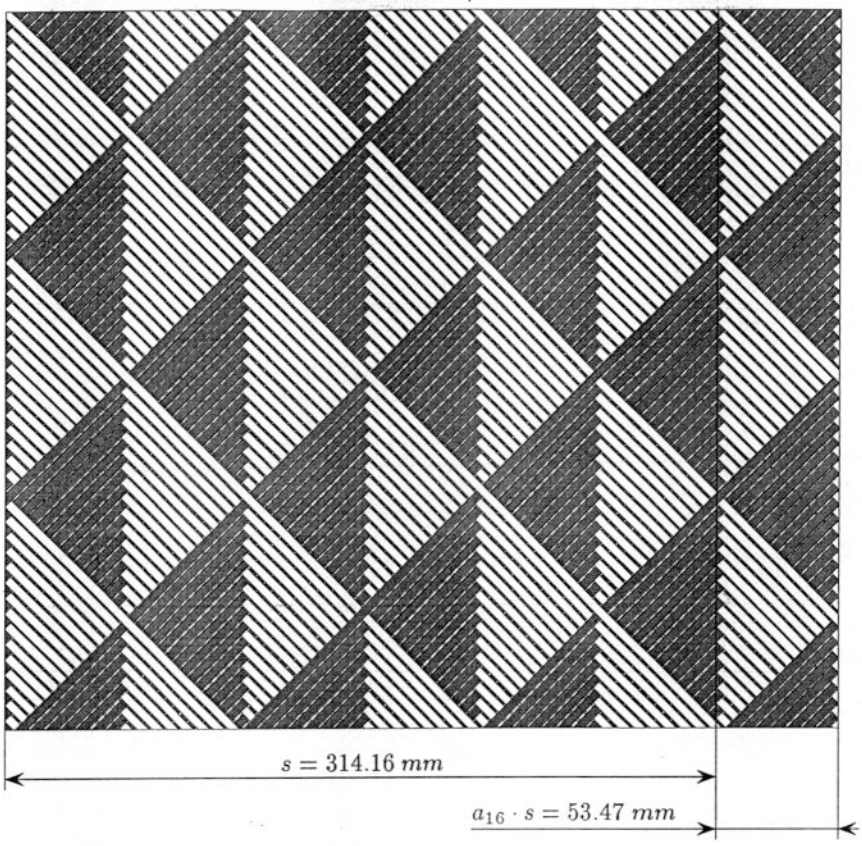
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/15



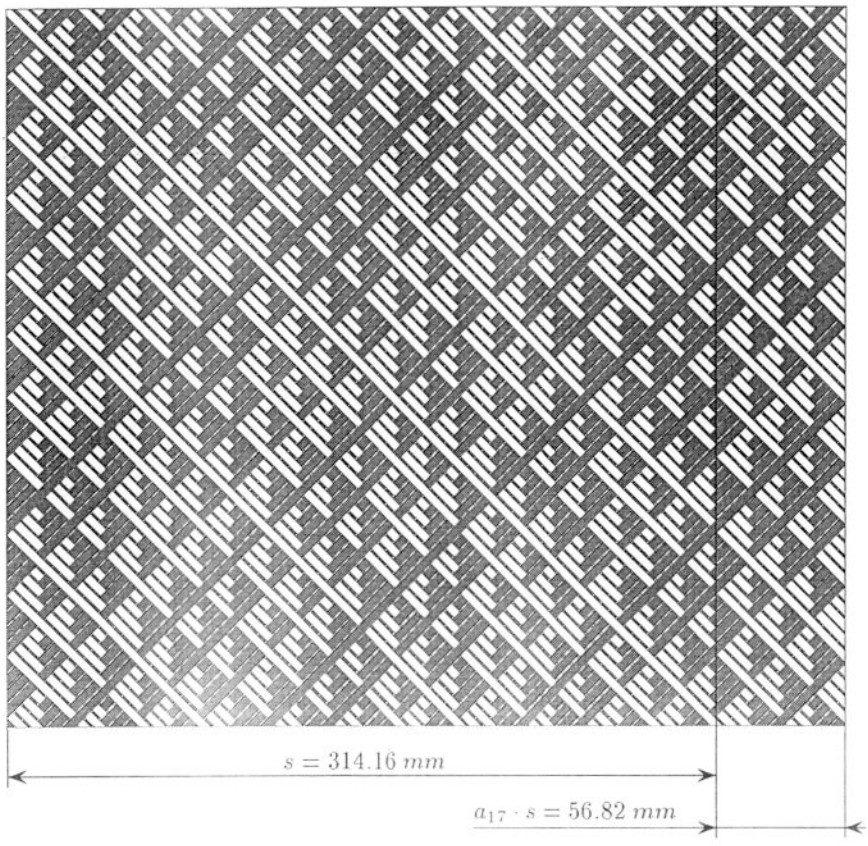
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/16



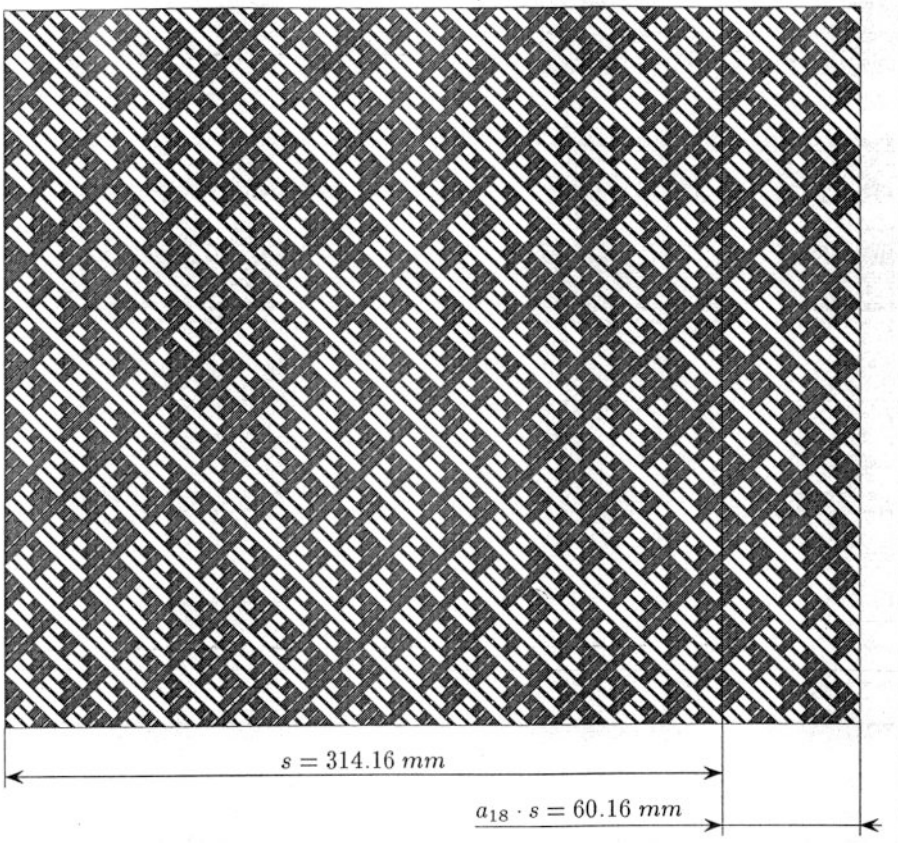
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/17



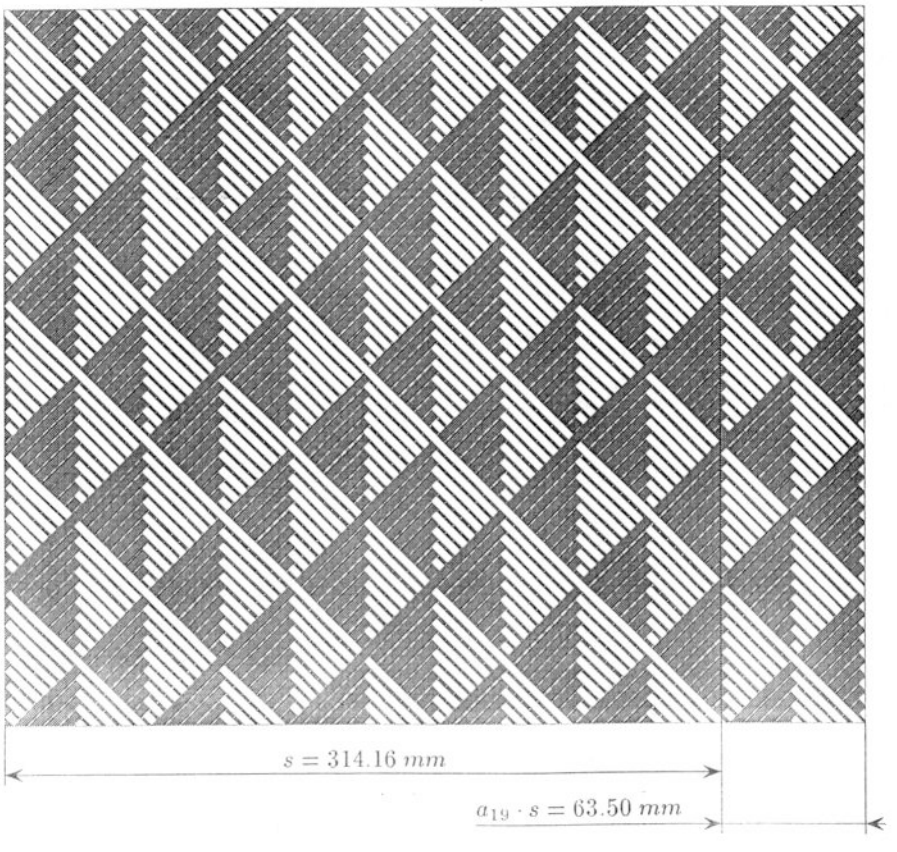
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/18



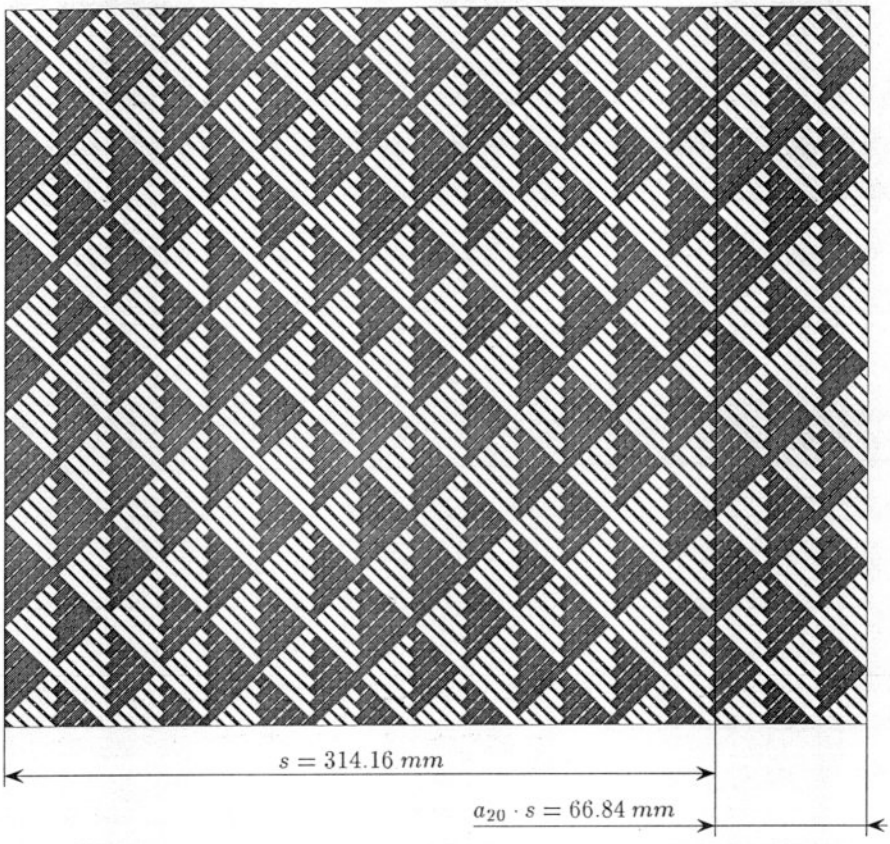
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/19



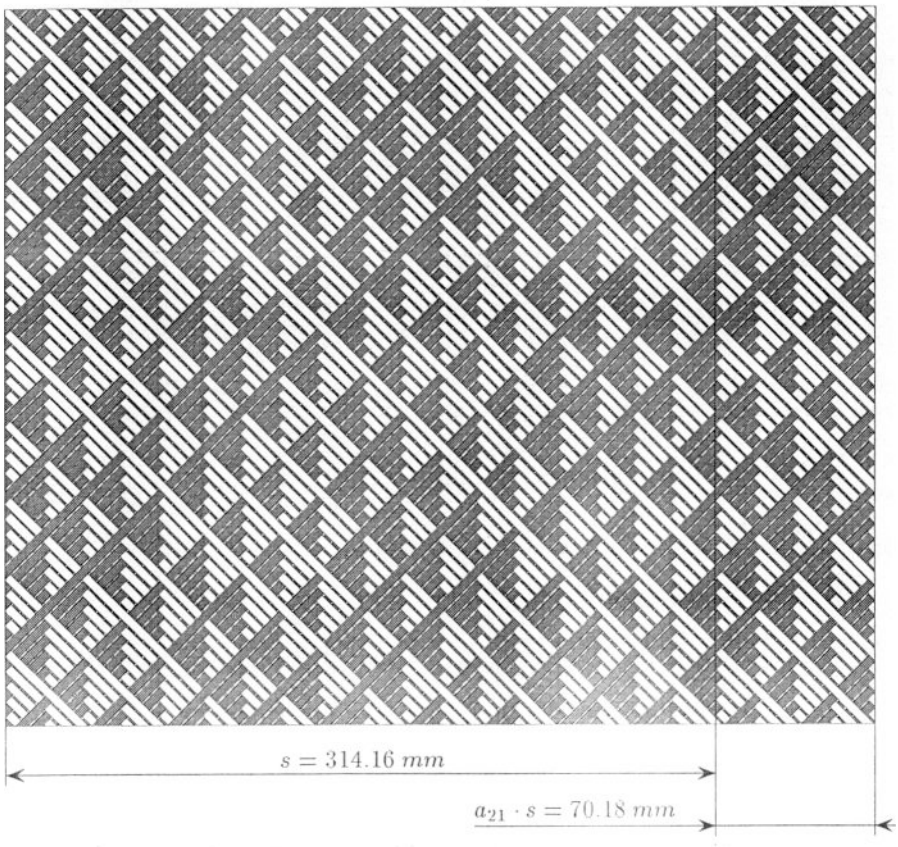
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/20



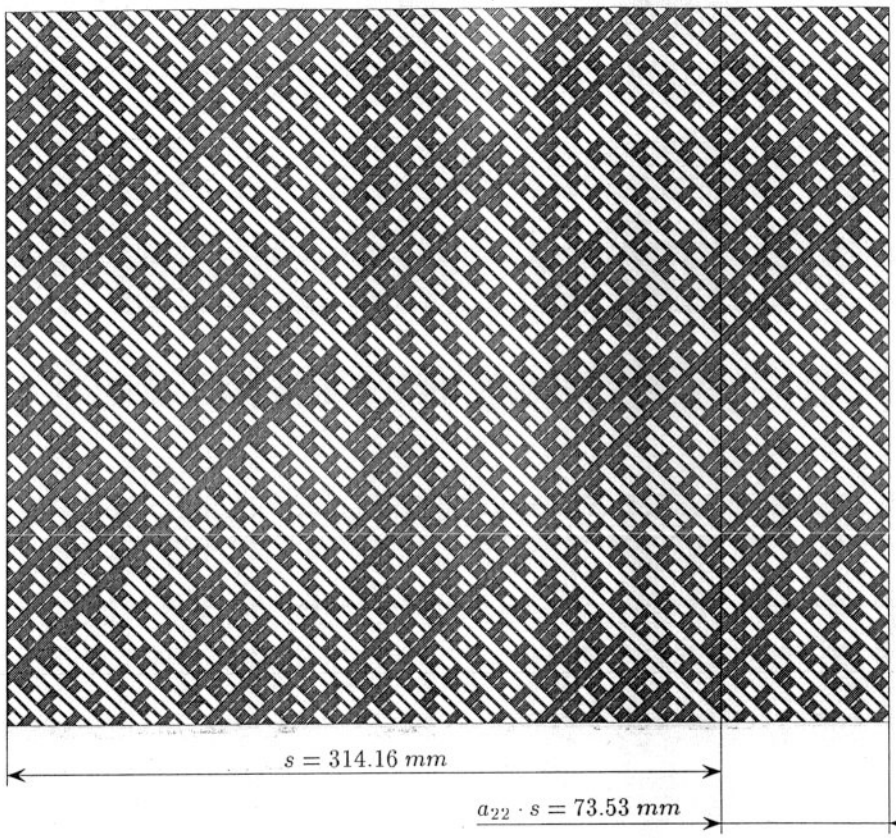
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/21



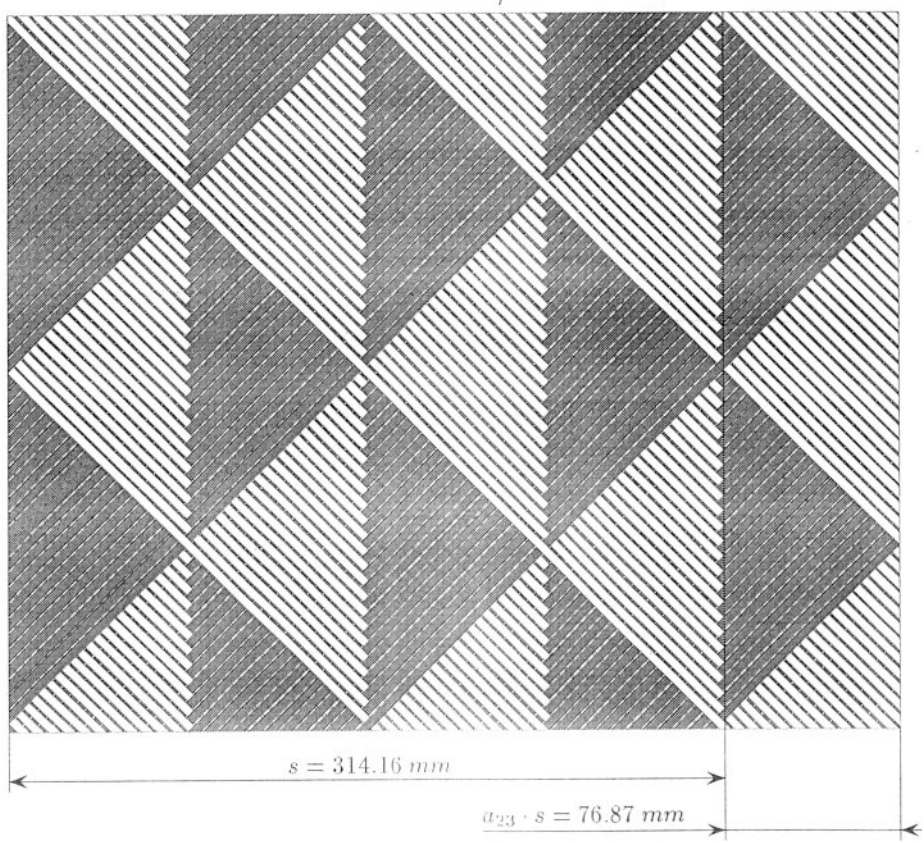
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 47/22



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

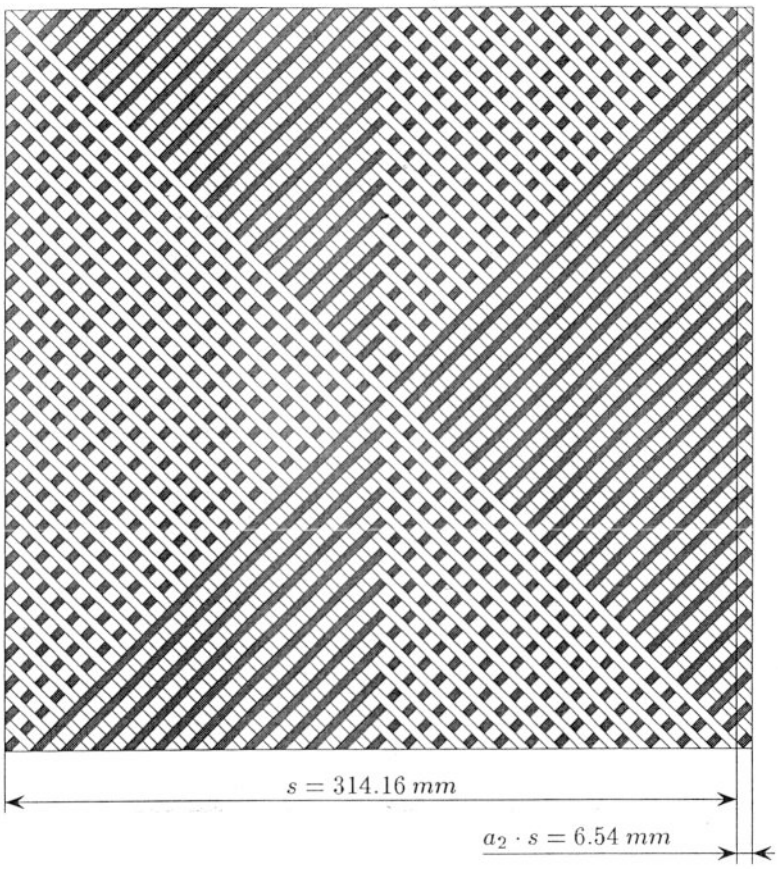
Tablica 47/23



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

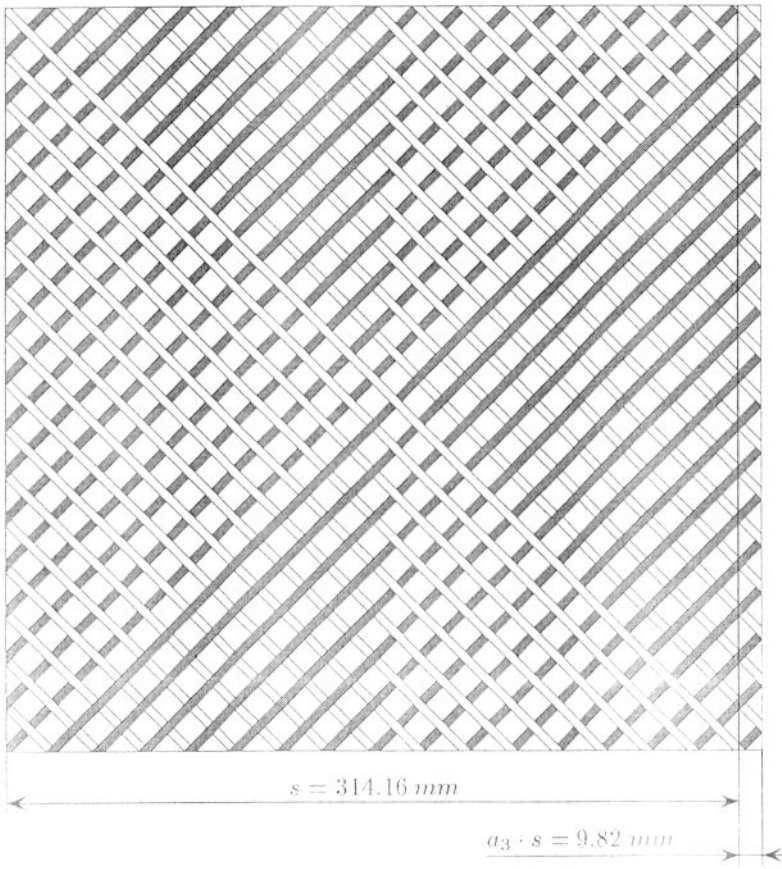
| Liczba wiązek rowingu: 48 | | |

Tablica 48/2



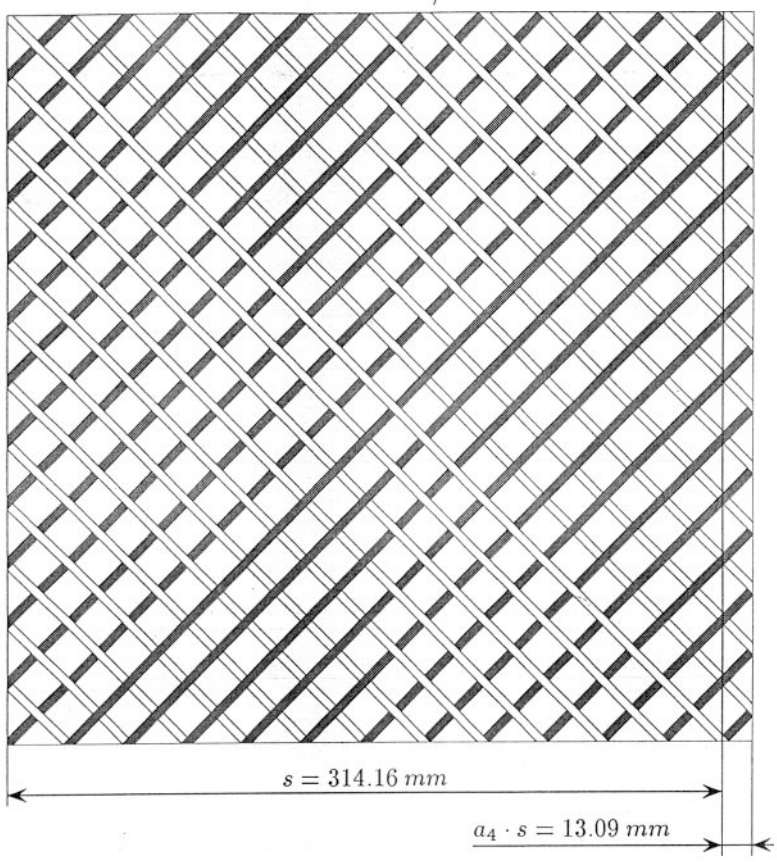
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/3



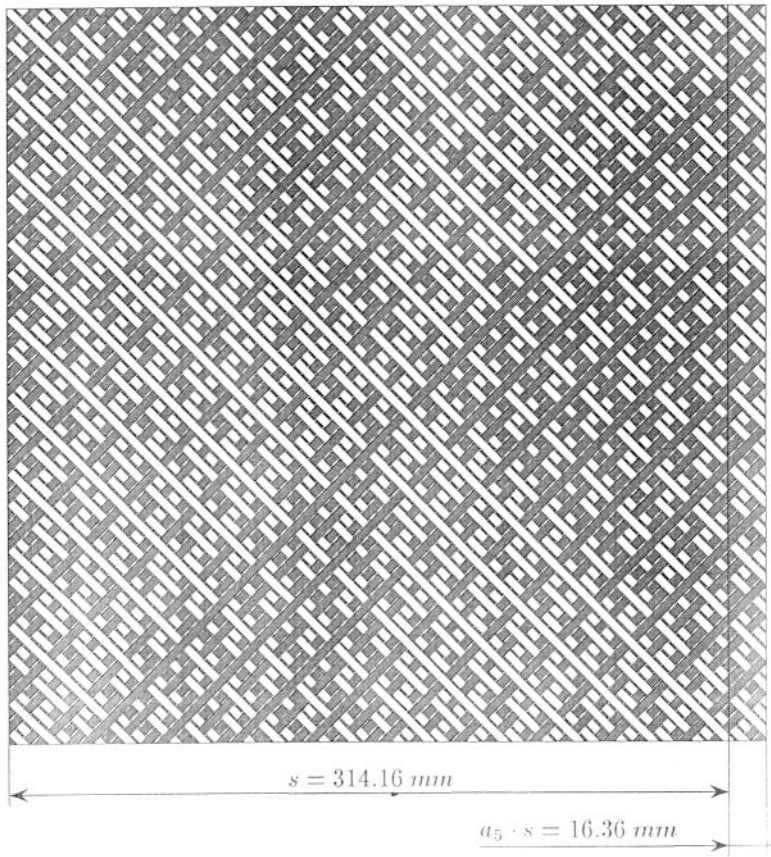
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/4



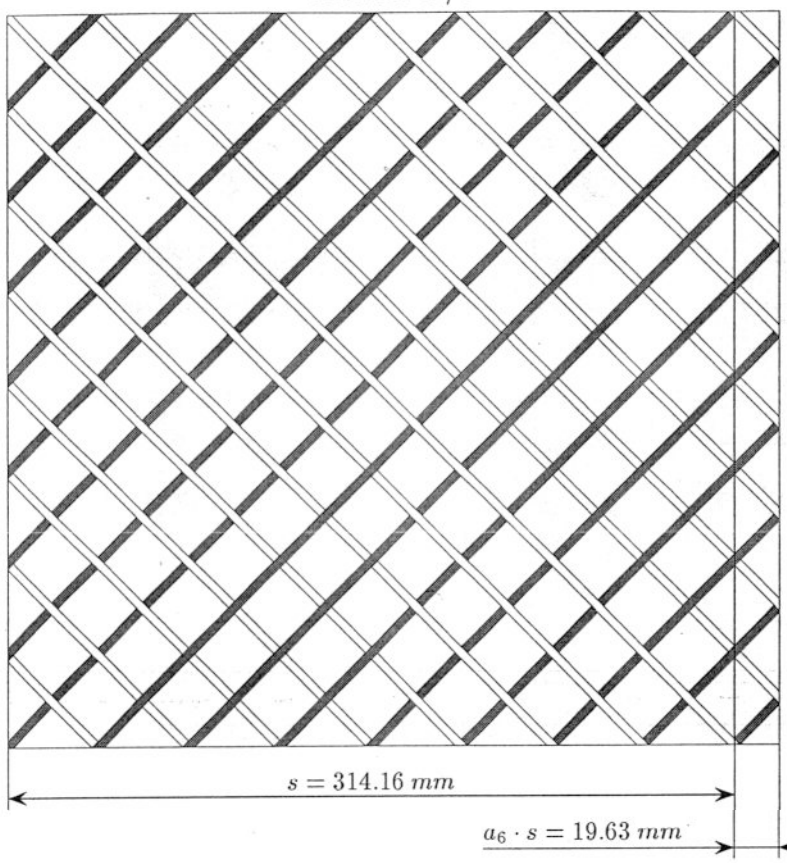
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/5



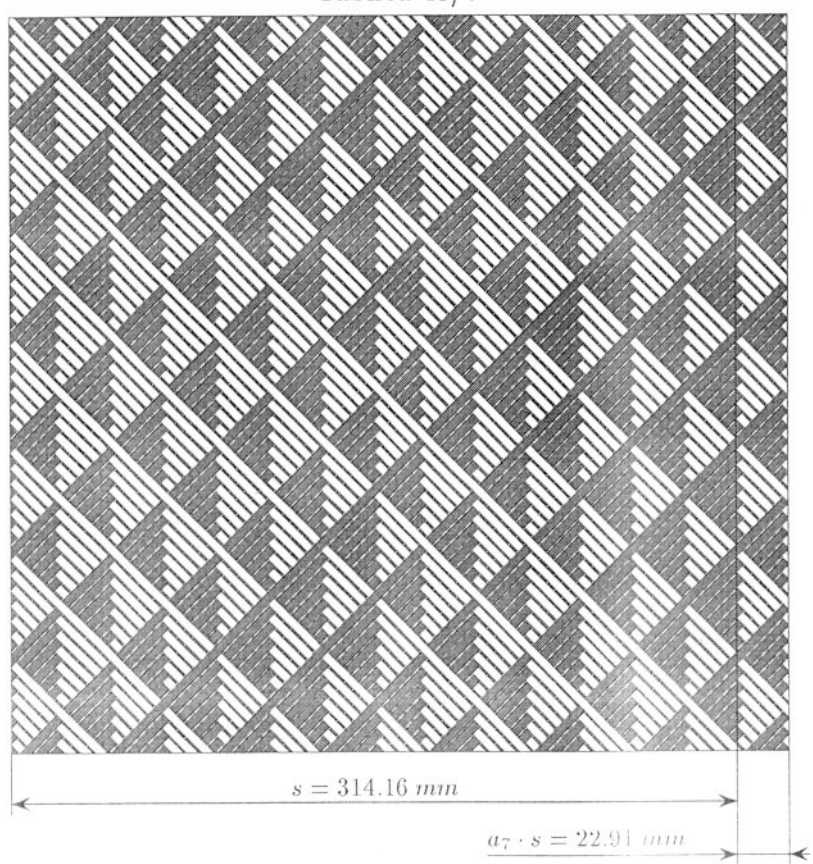
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/6



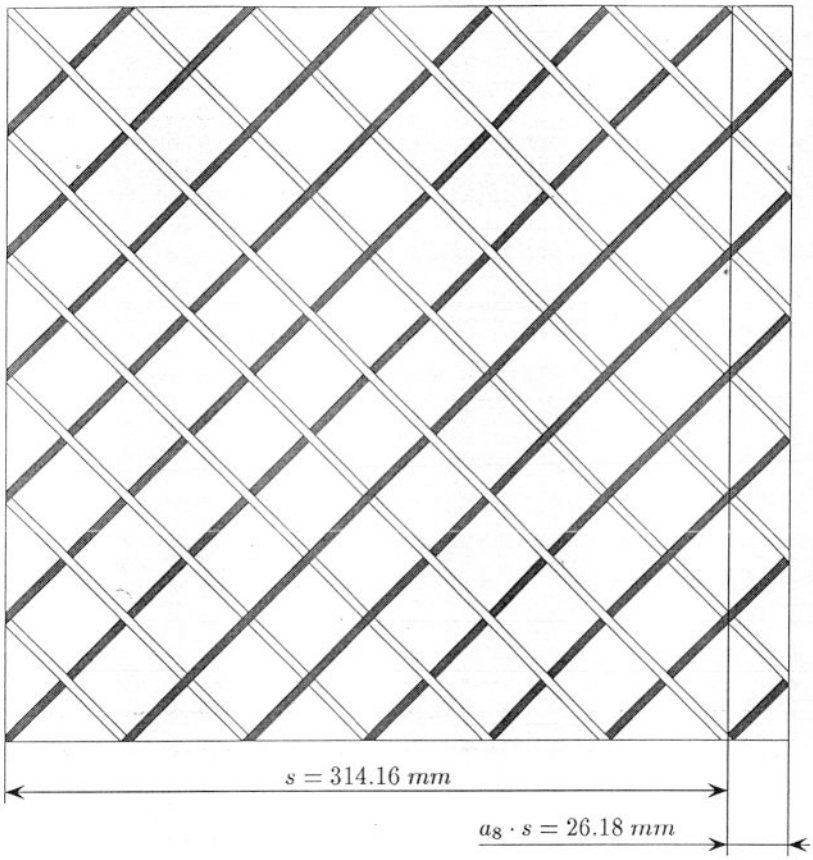
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/7



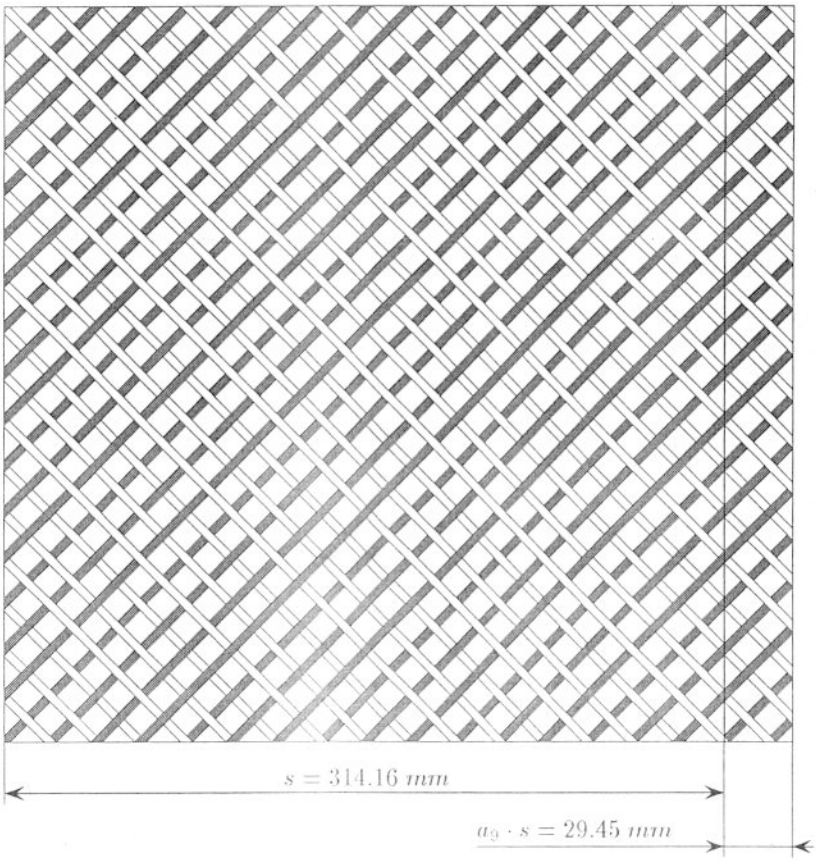
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/8



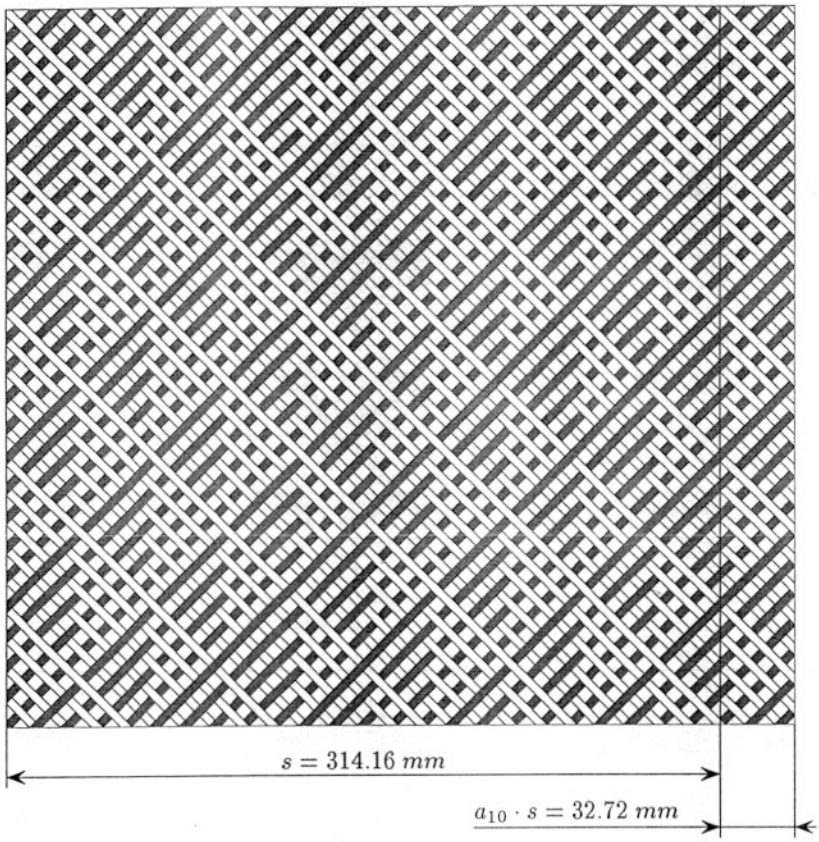
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/9



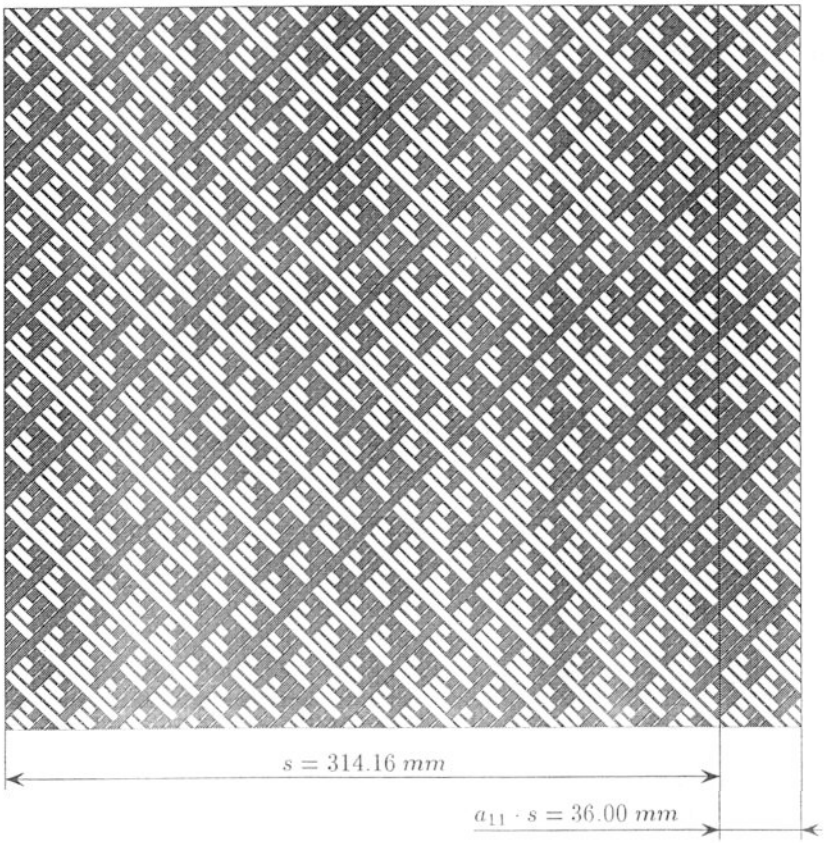
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/10



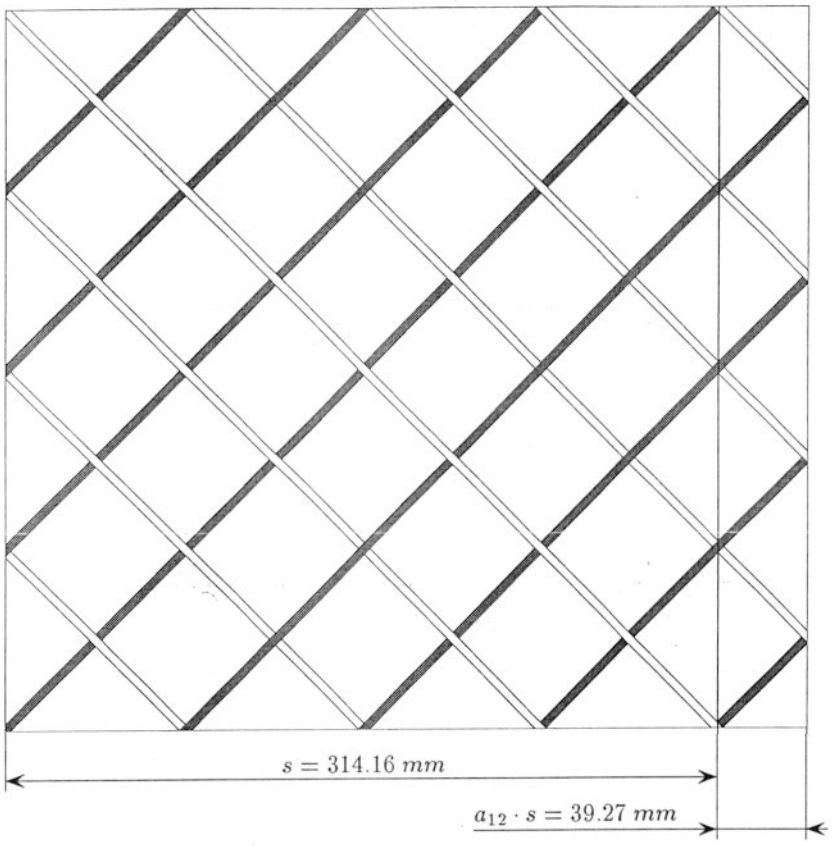
$d = 100.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/11



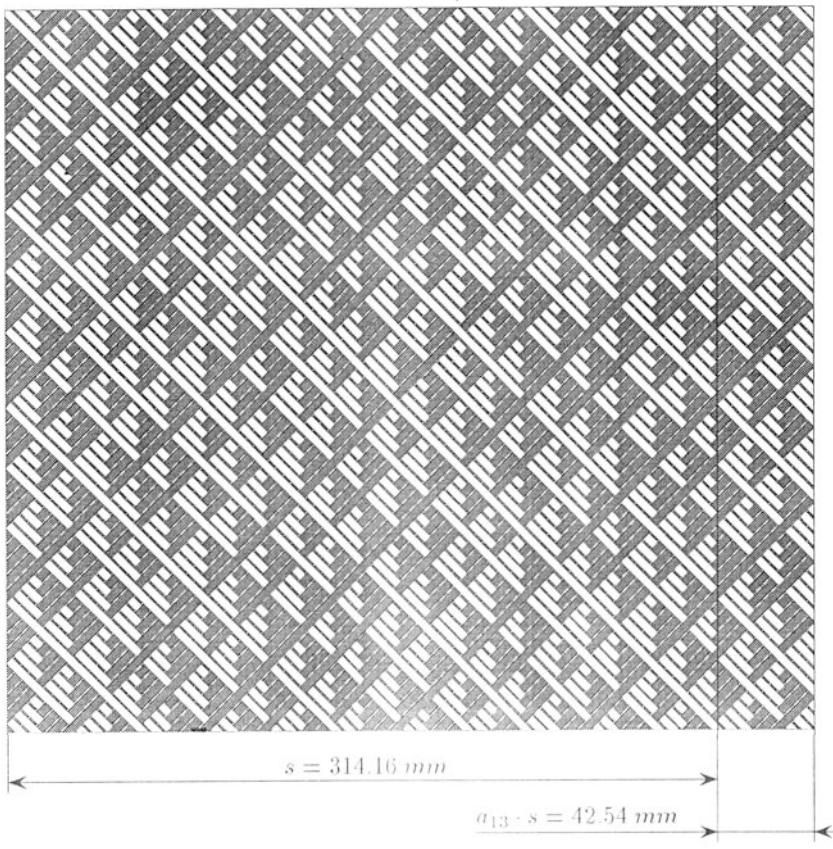
$d = 100.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/12



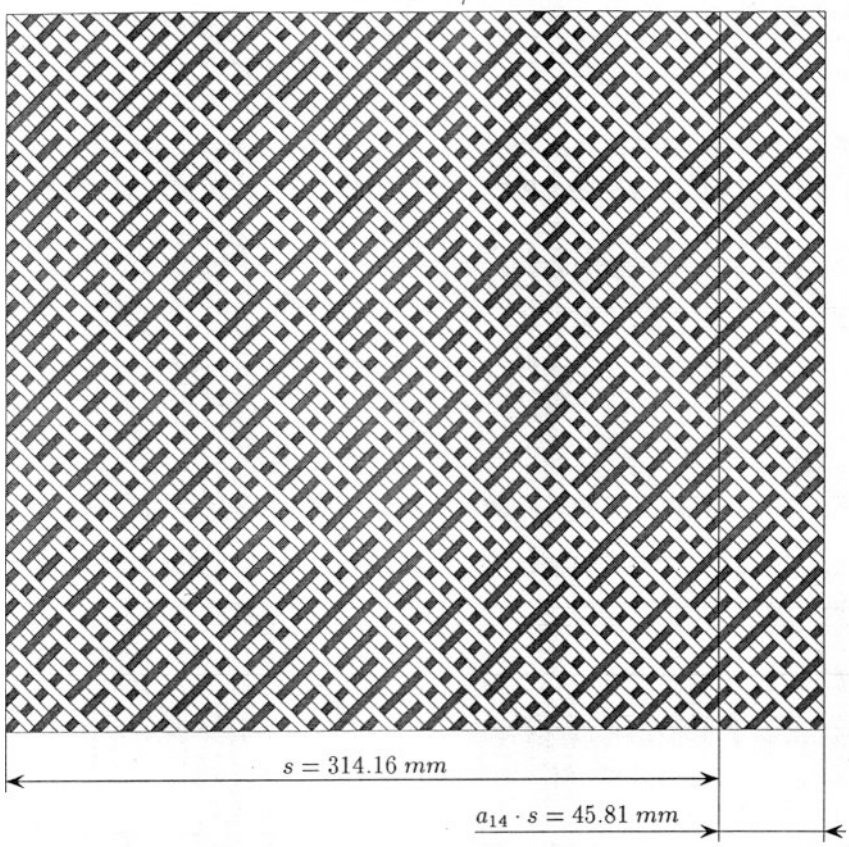
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 48/13



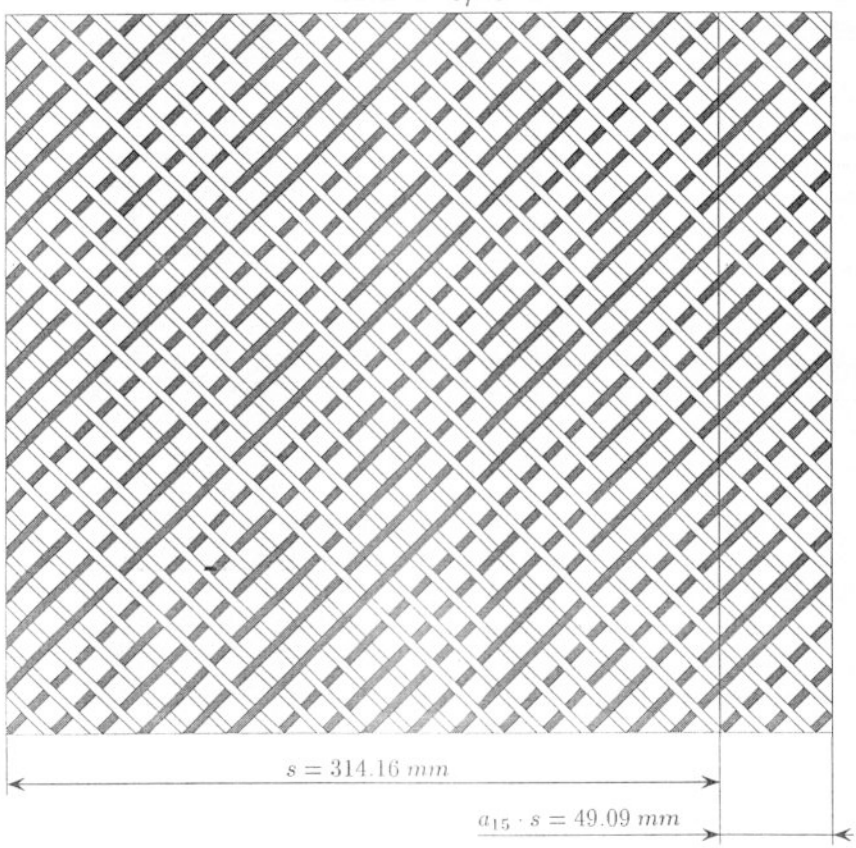
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00^{o}$

Tablica 48/14



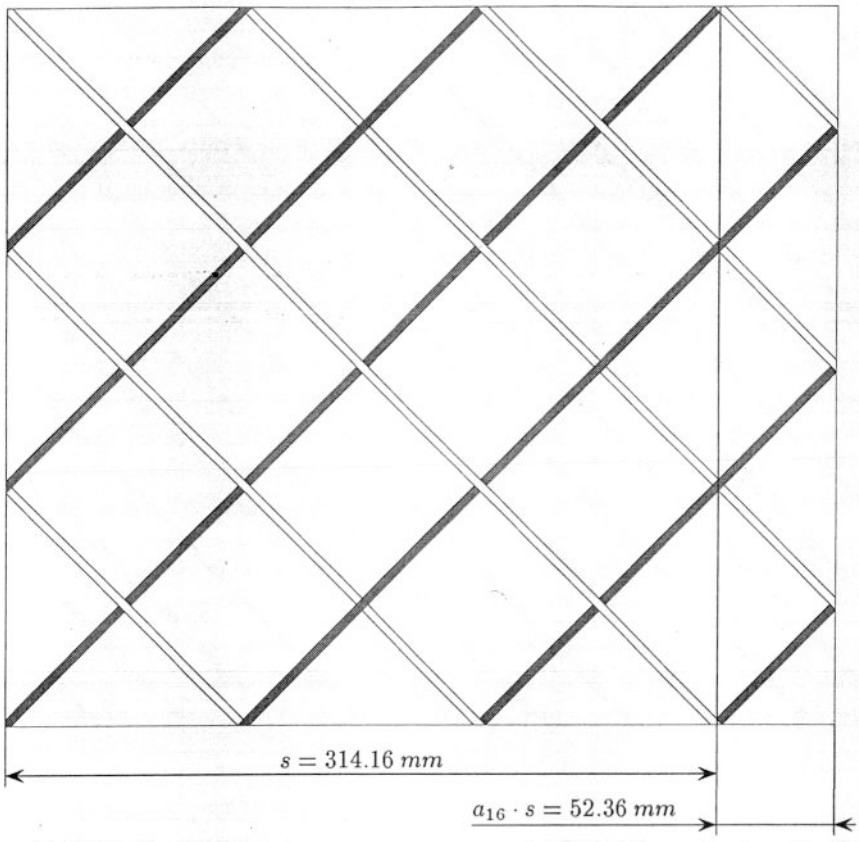
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/15



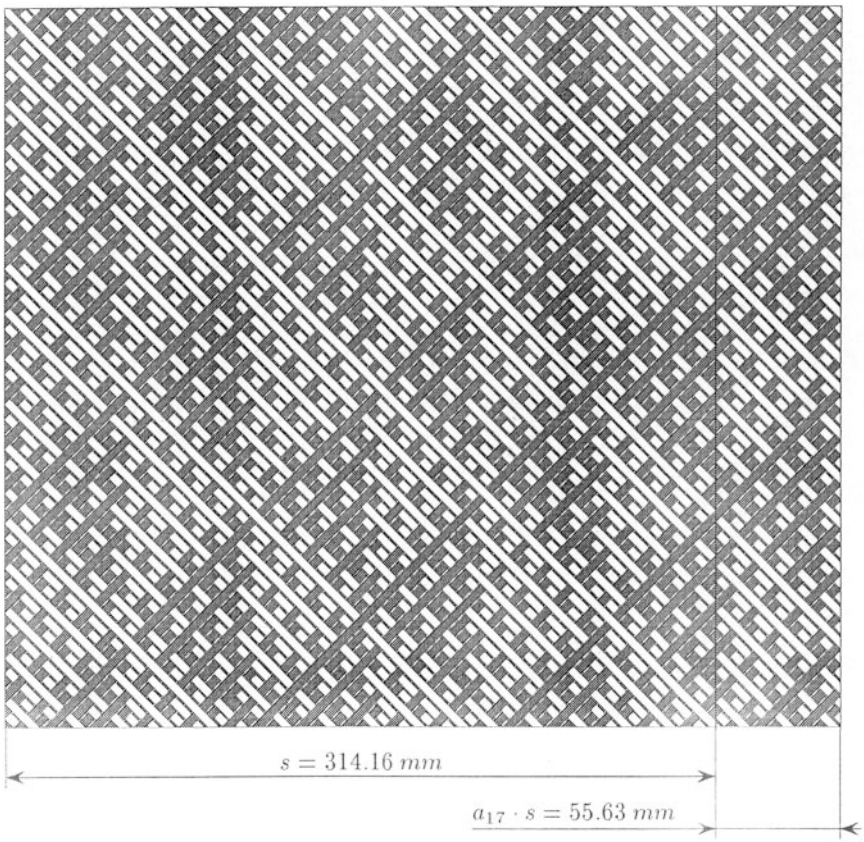
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/16



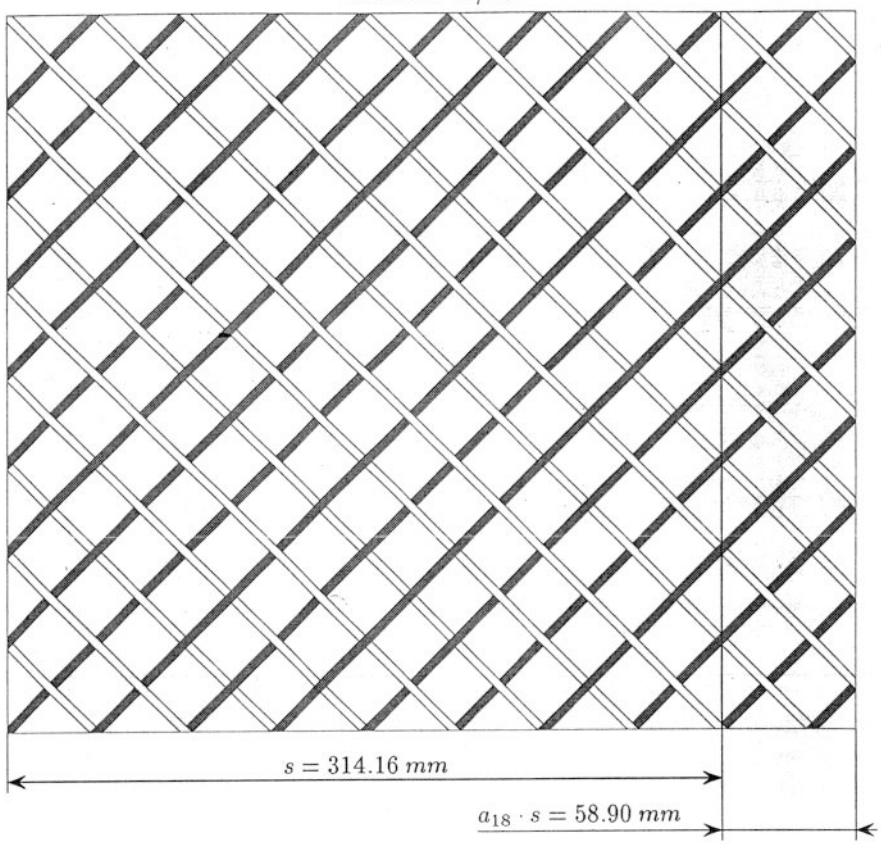
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/17



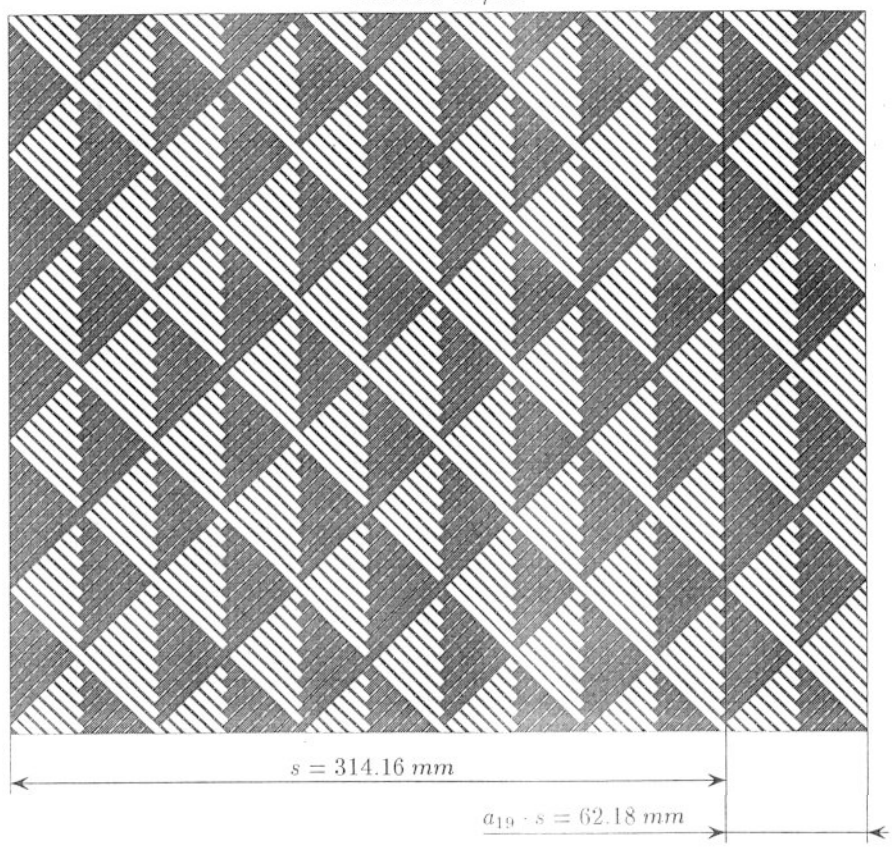
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/18



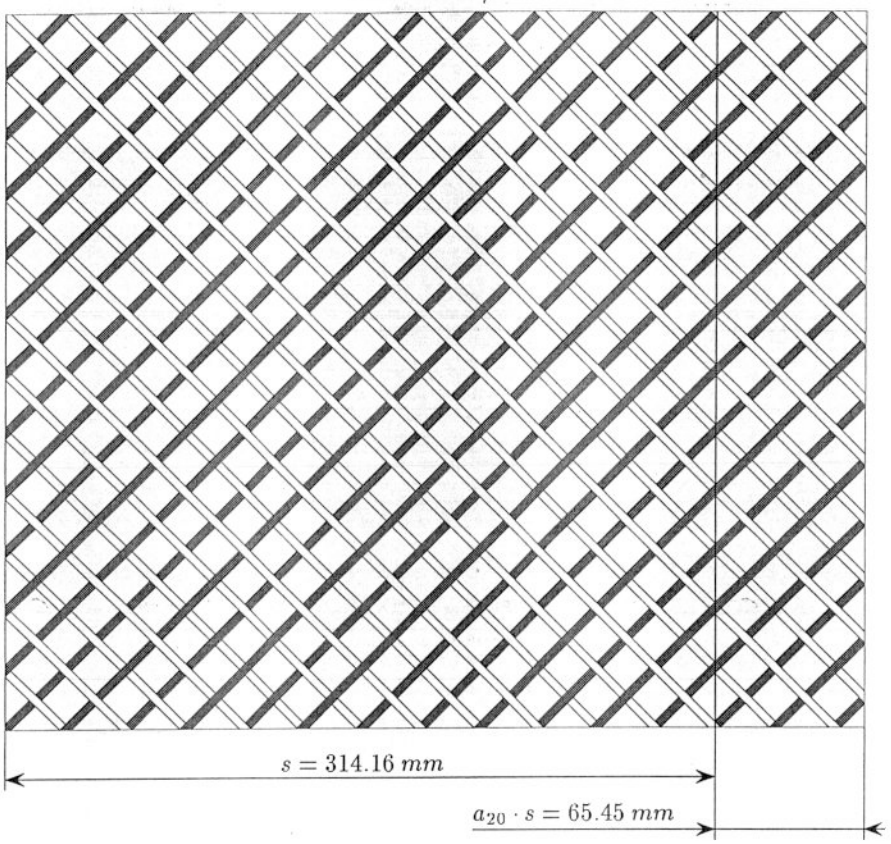
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/19



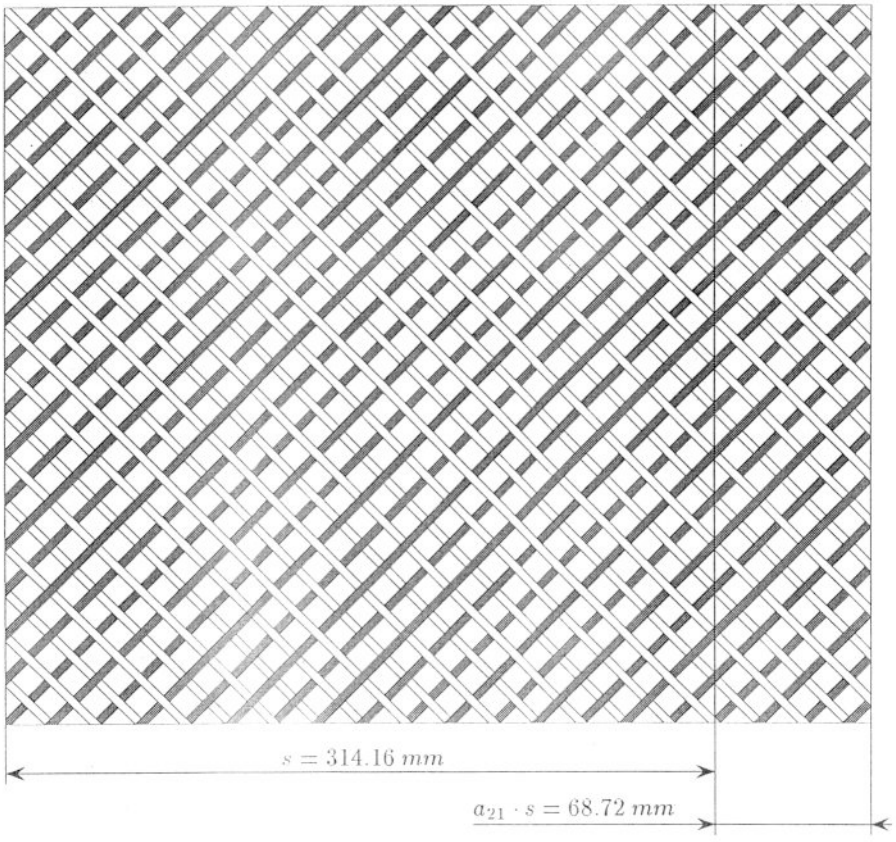
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/20



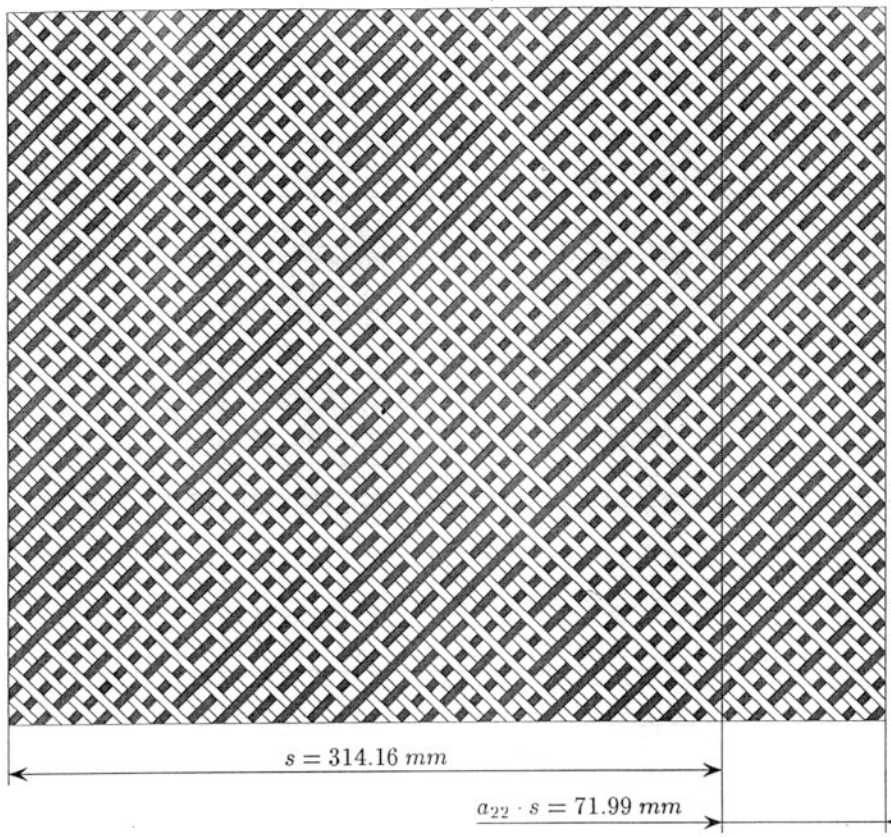
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/21



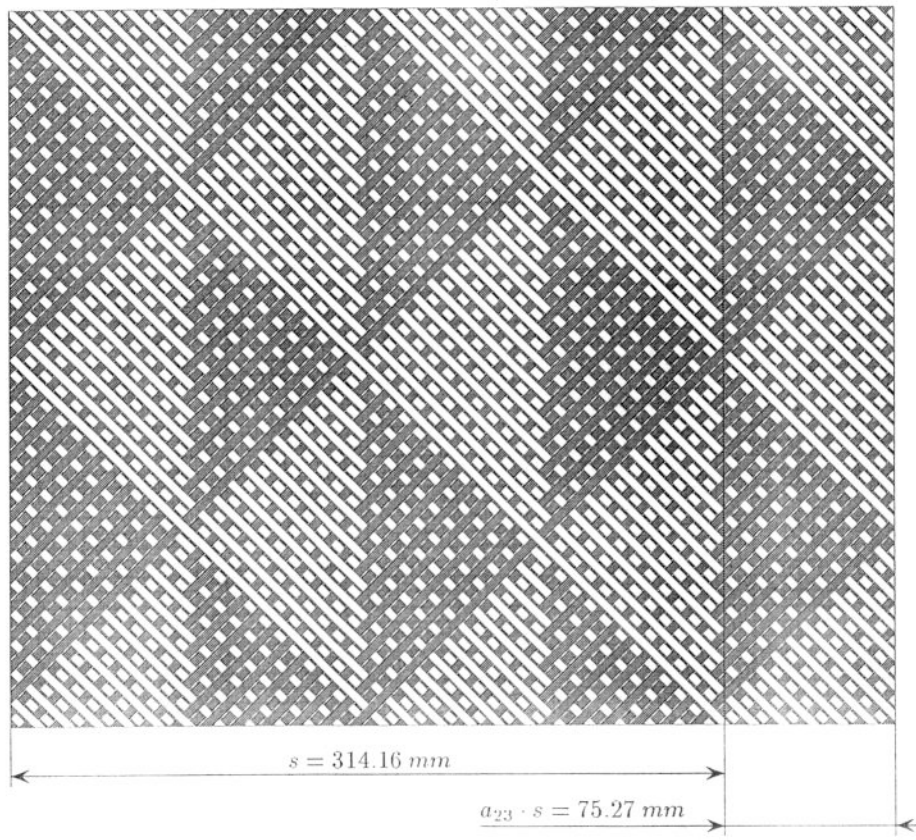
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/22



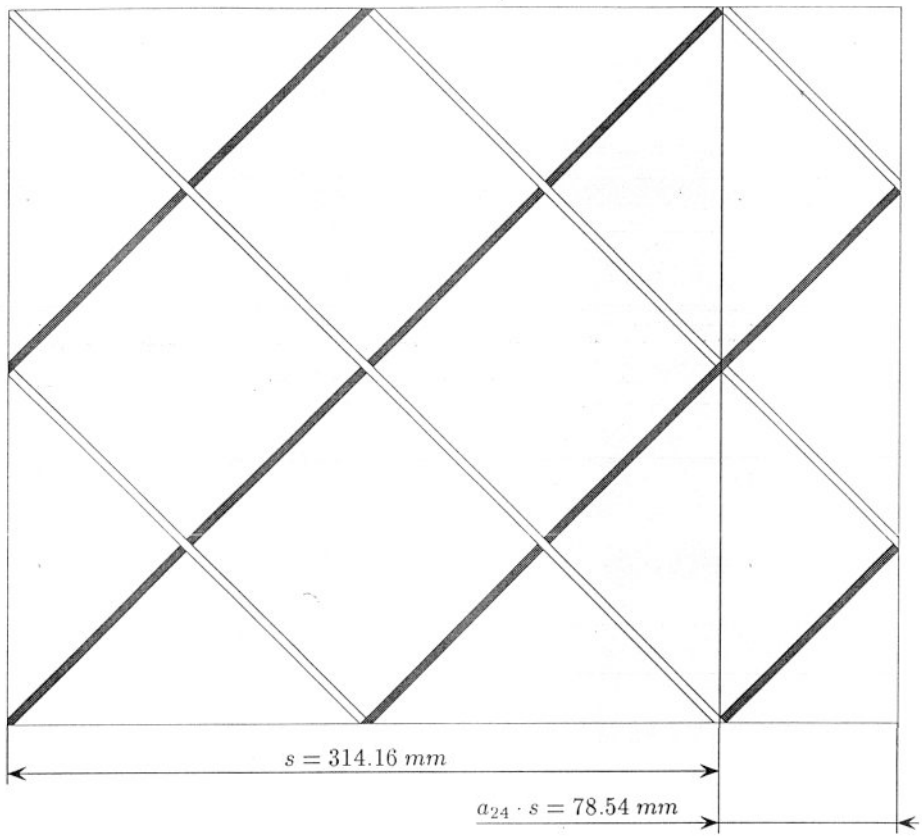
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 48/23



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

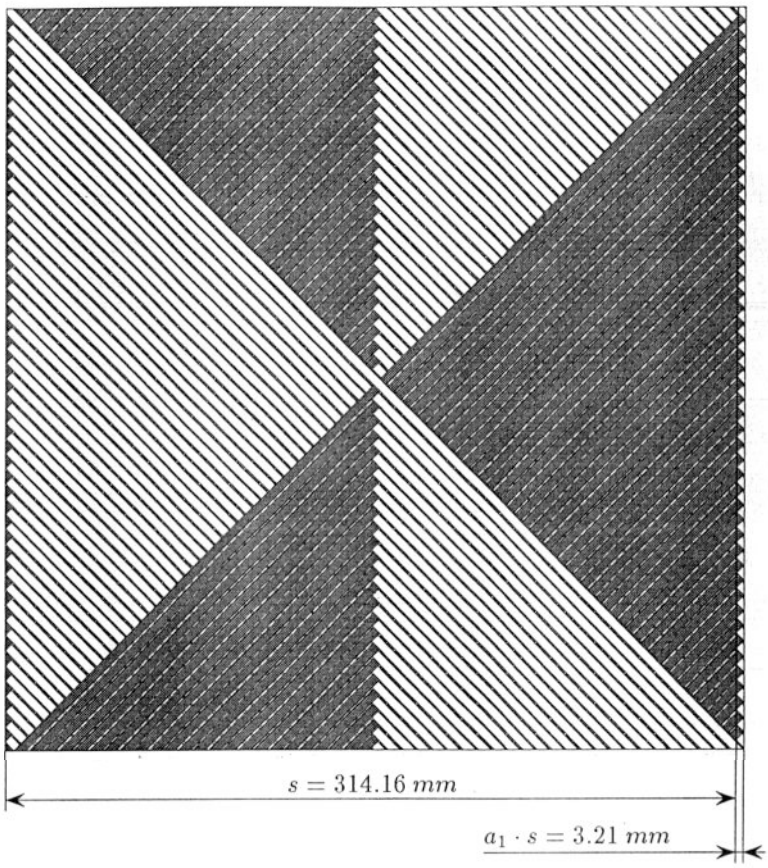
Tablica 48/24



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

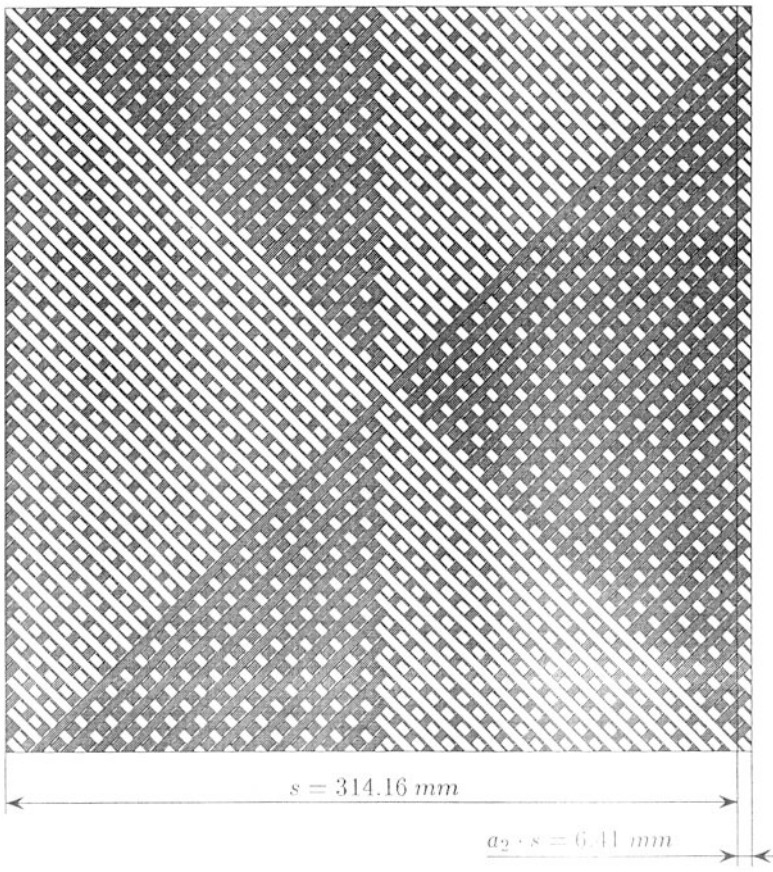
| Liczba wiązek rowingu: 49 | | |

Tablica 49/1



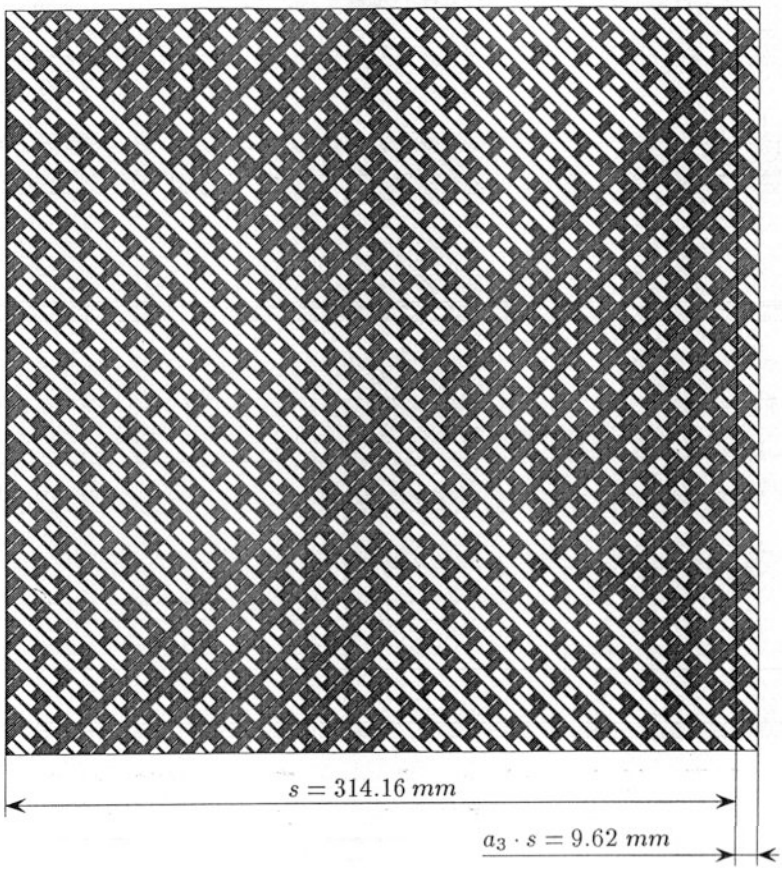
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/2



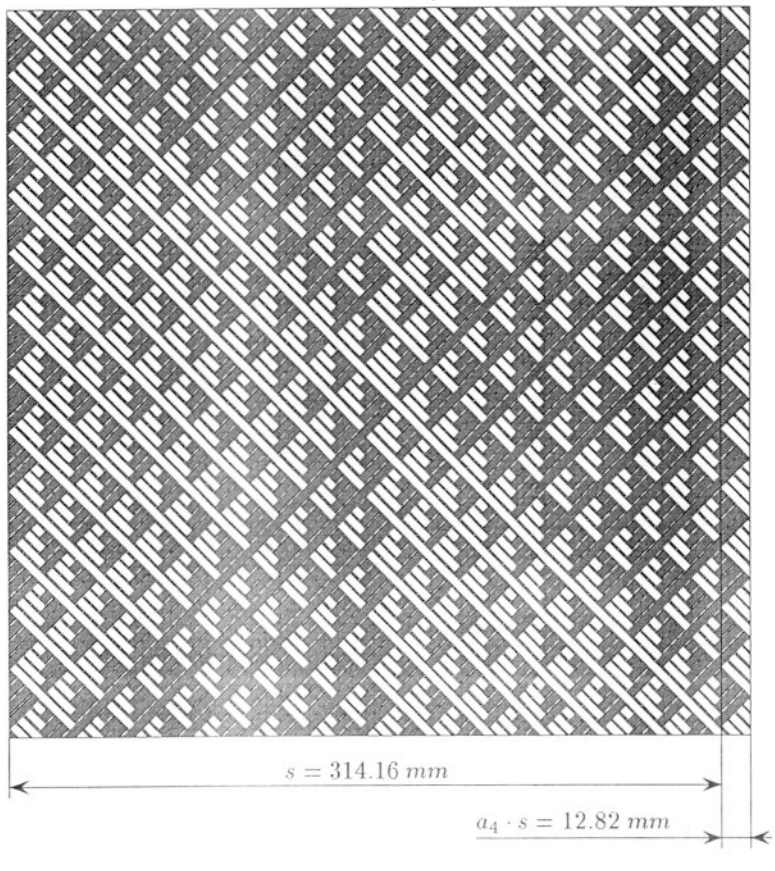
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/3



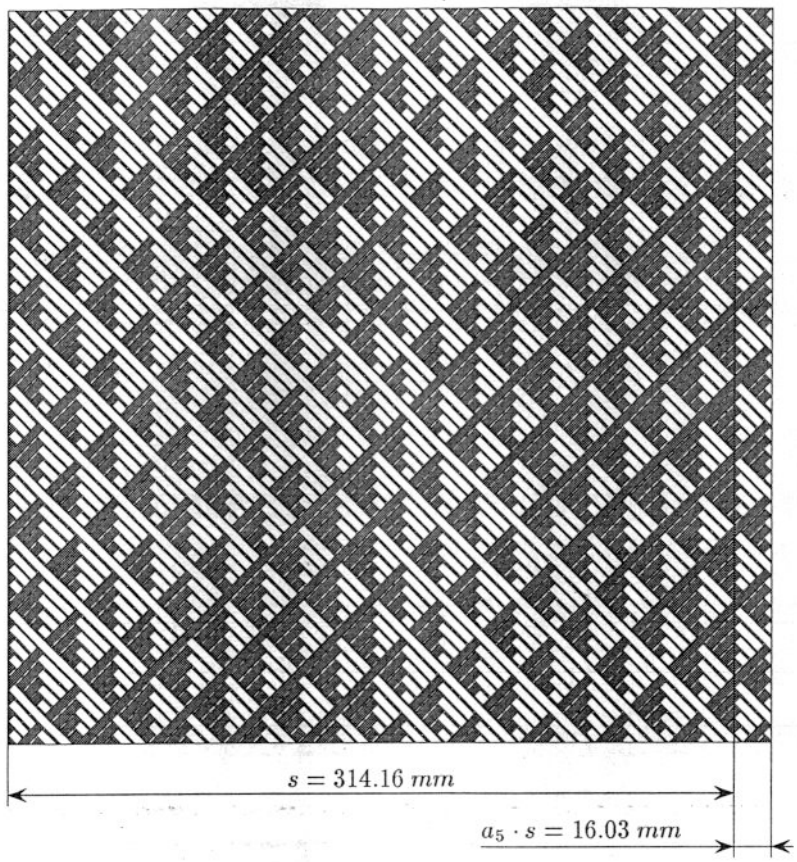
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/4



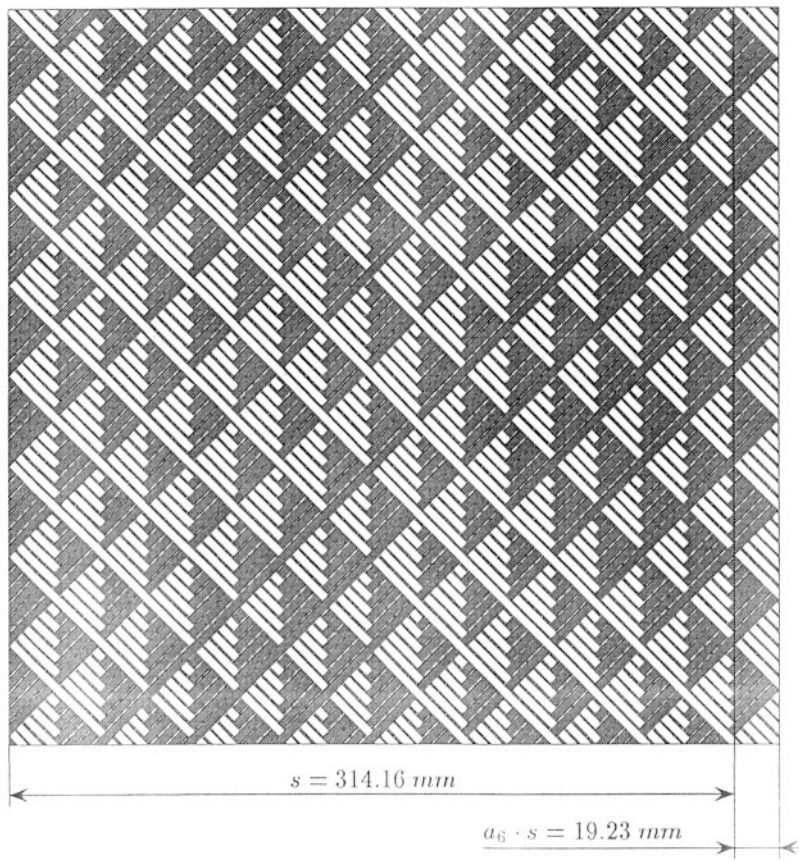
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/5



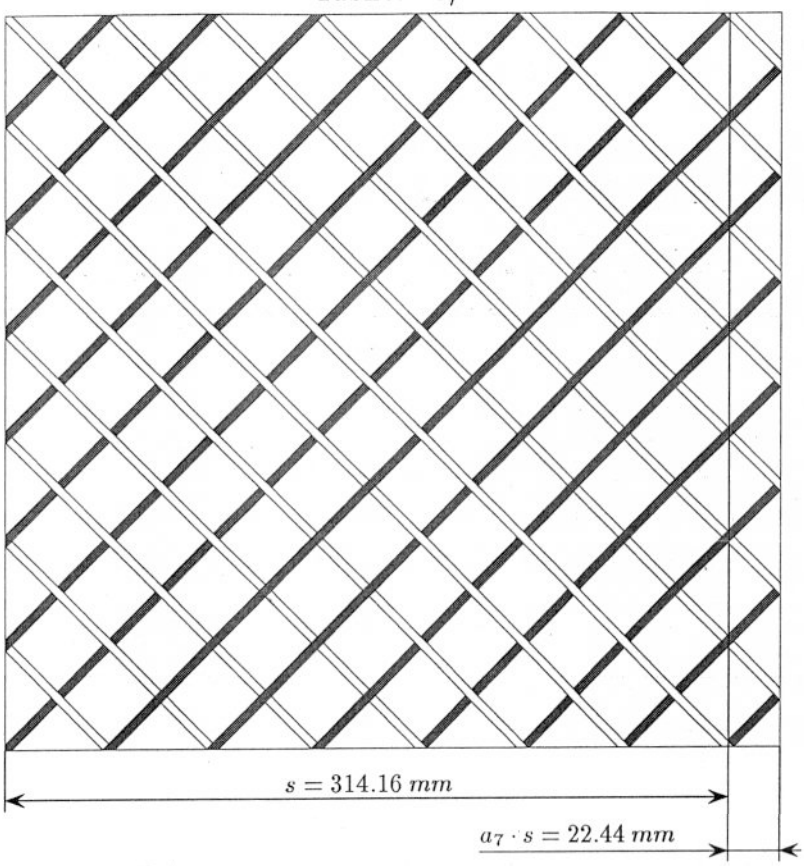
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/6



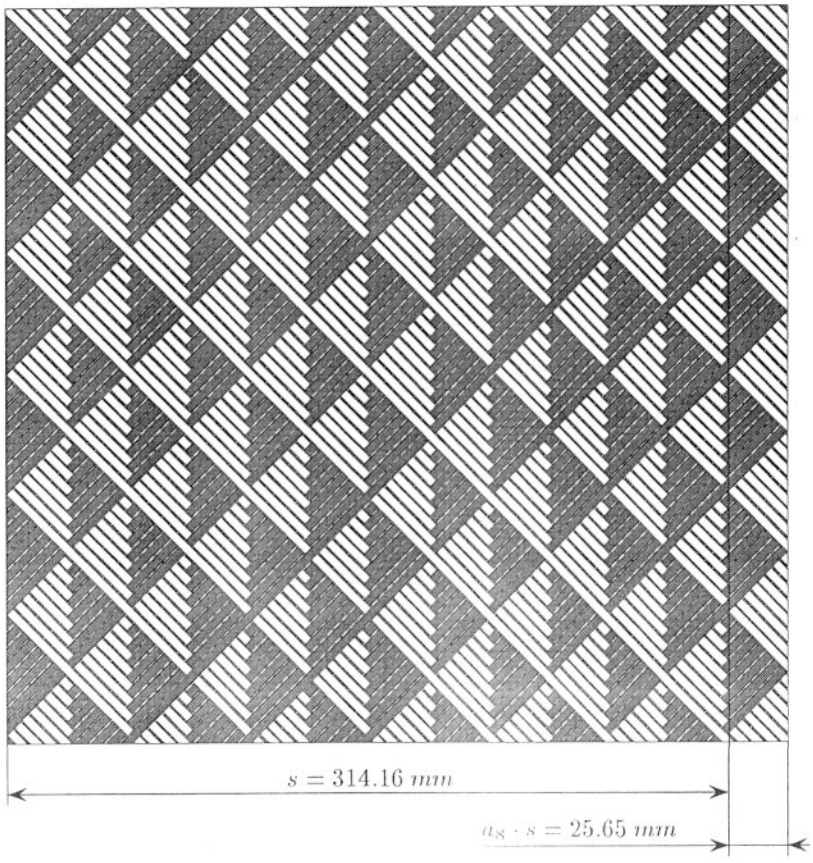
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/7



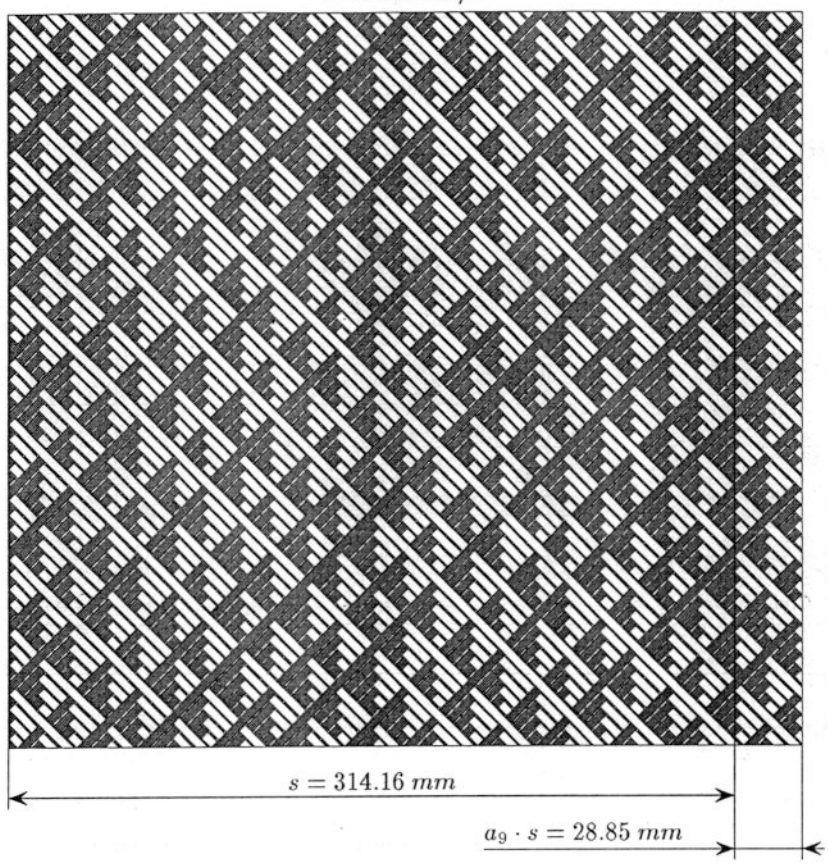
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/8



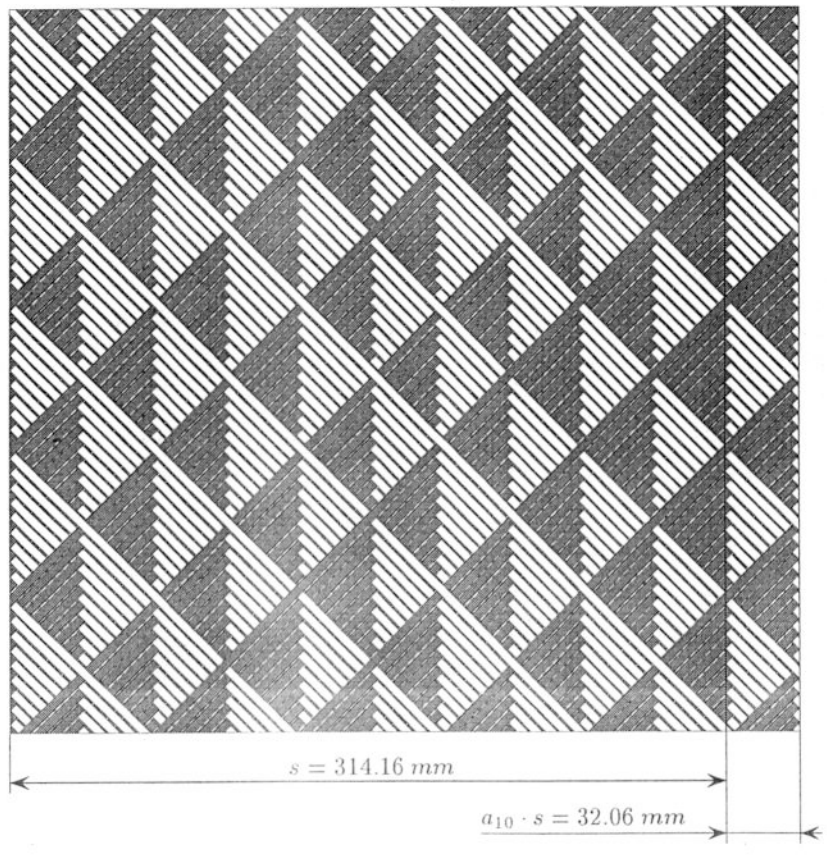
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/9



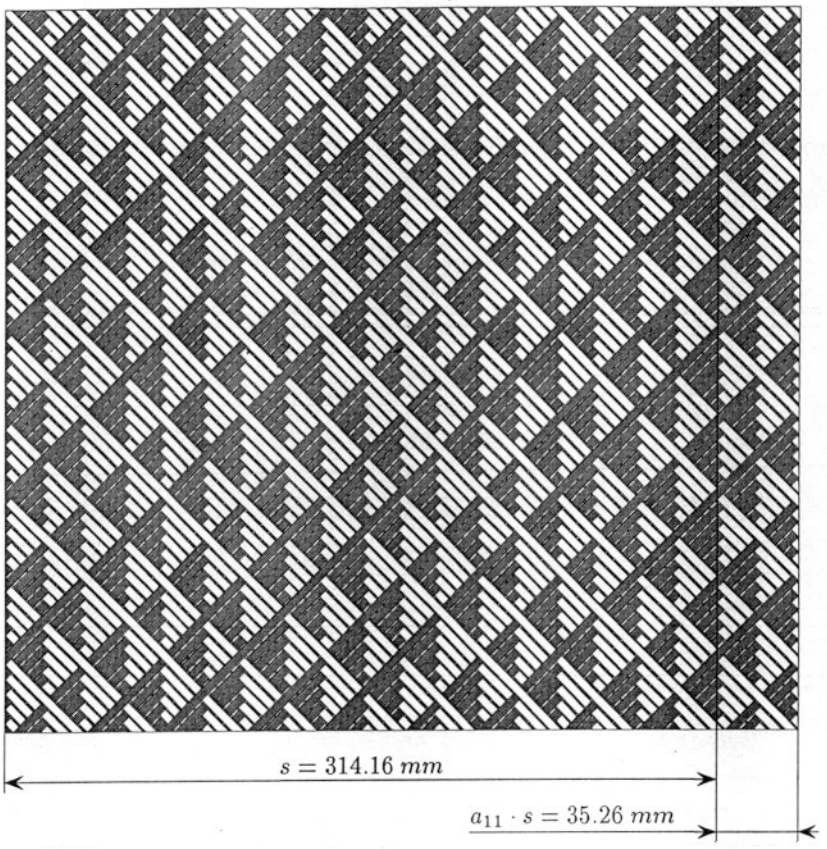
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/10



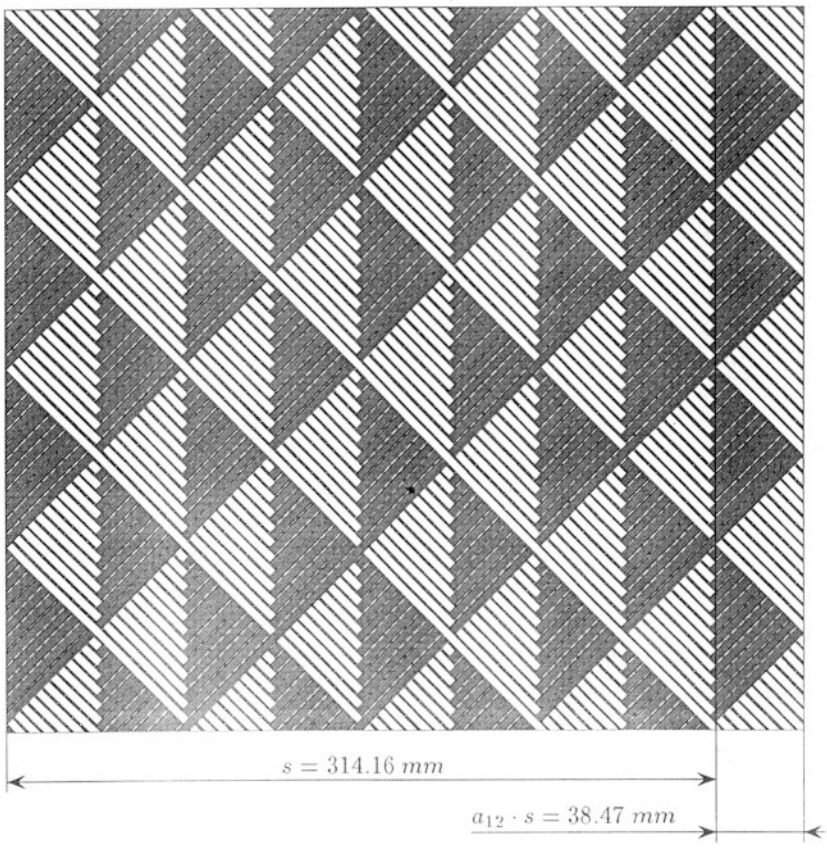
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/11



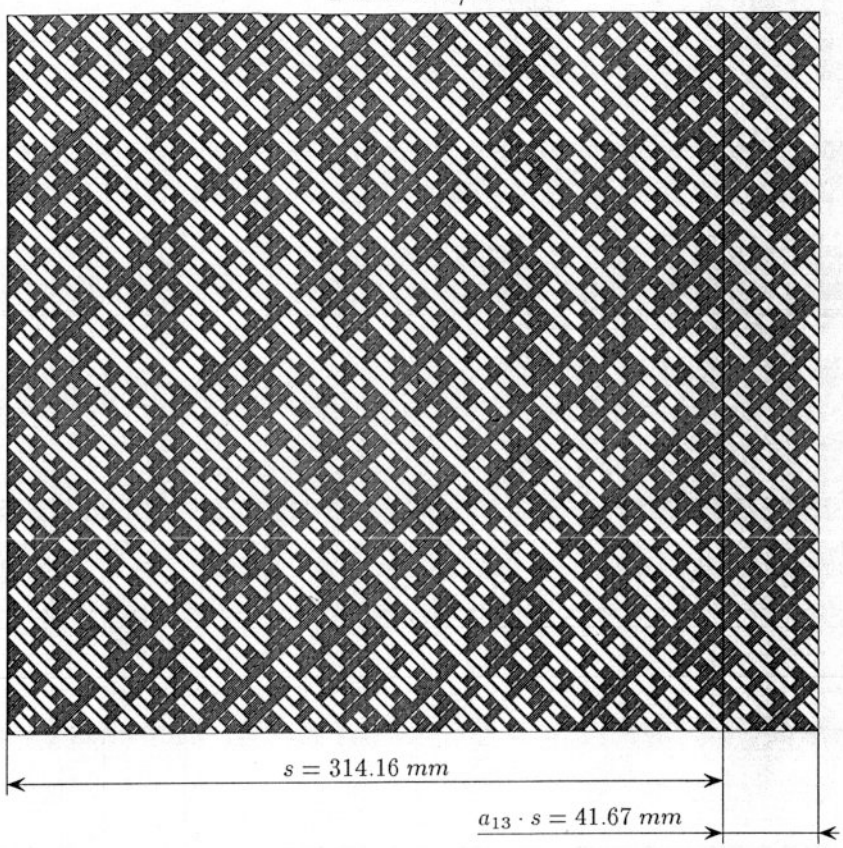
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/12



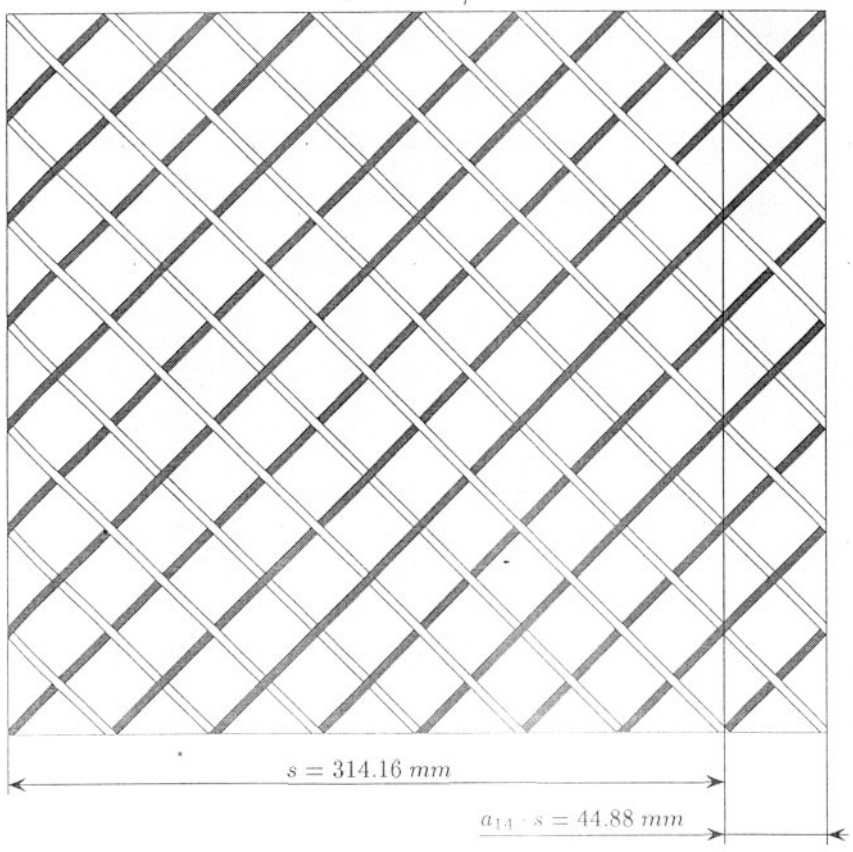
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/13



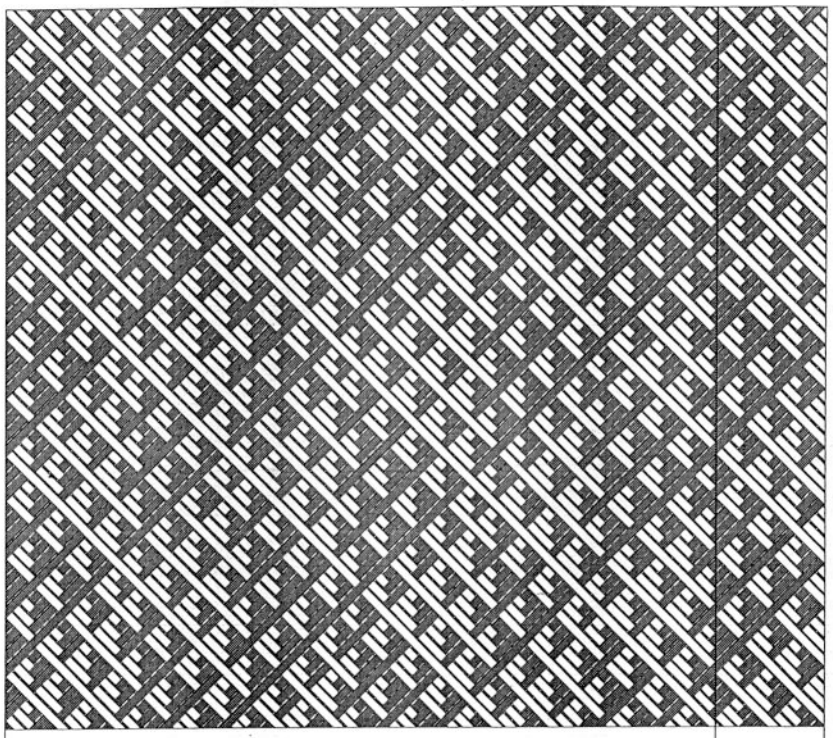
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/14



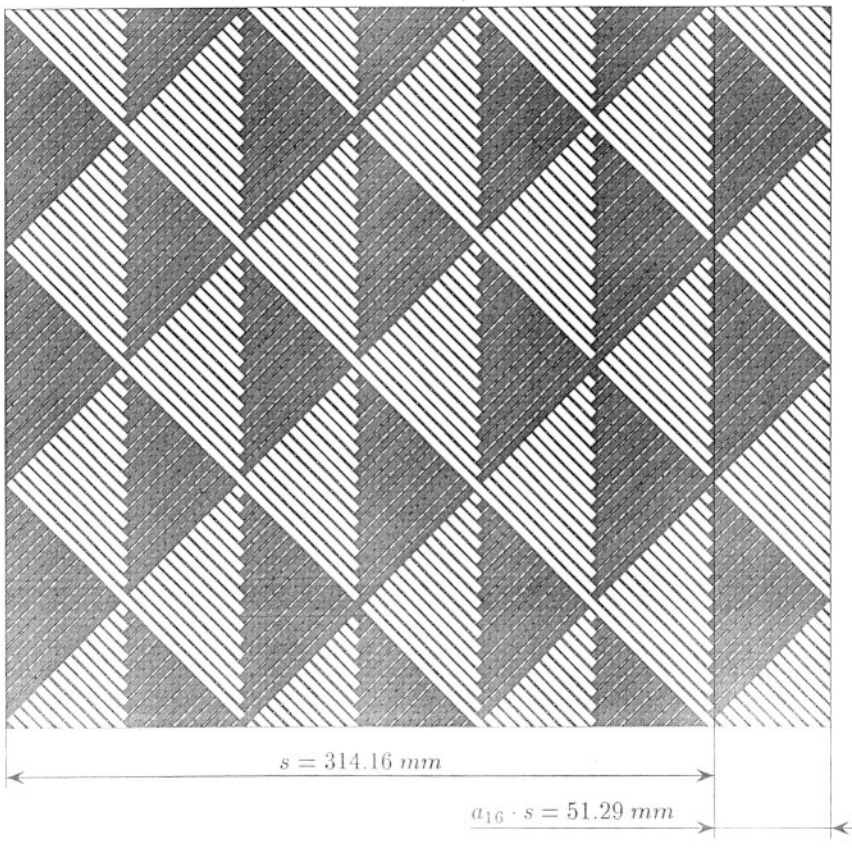
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/15



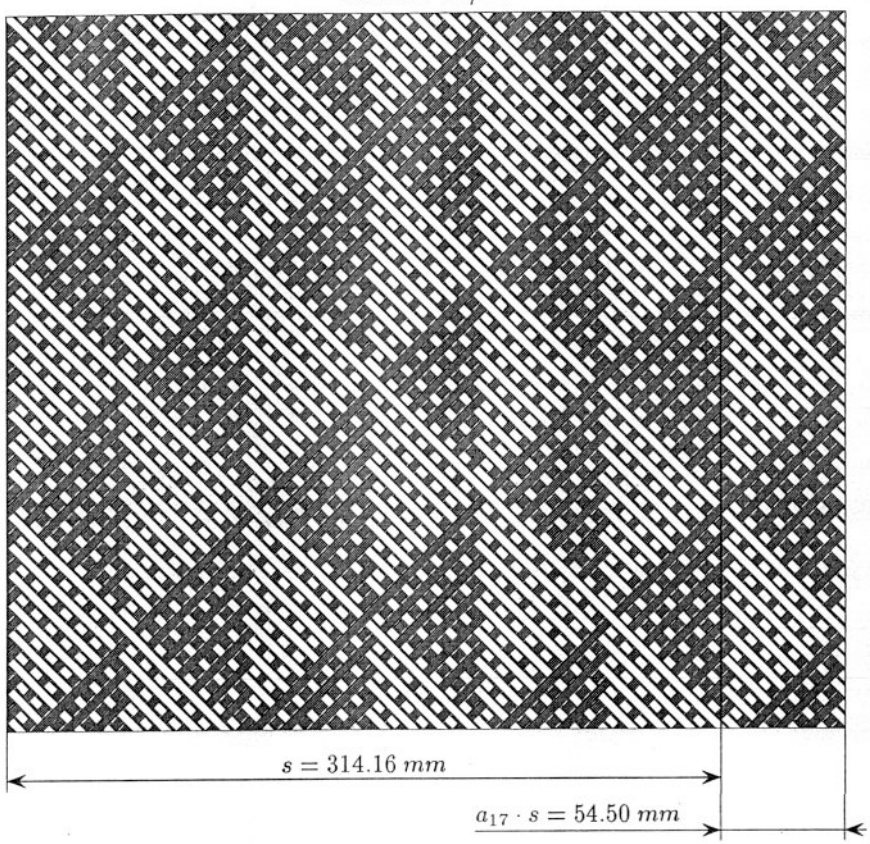
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/16



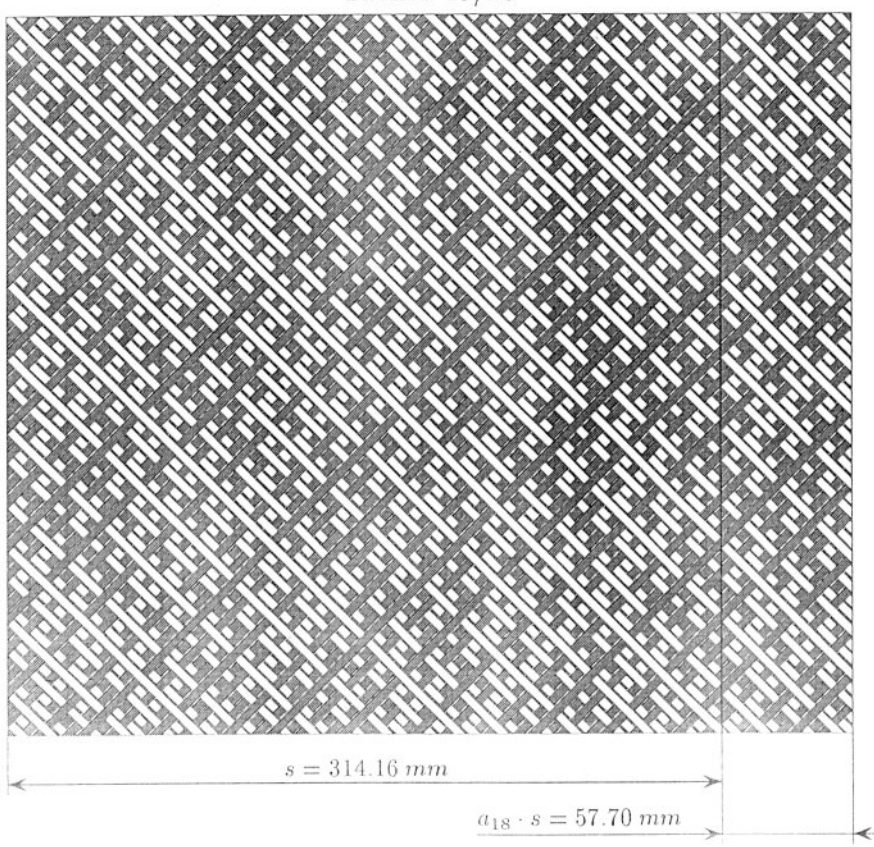
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/17



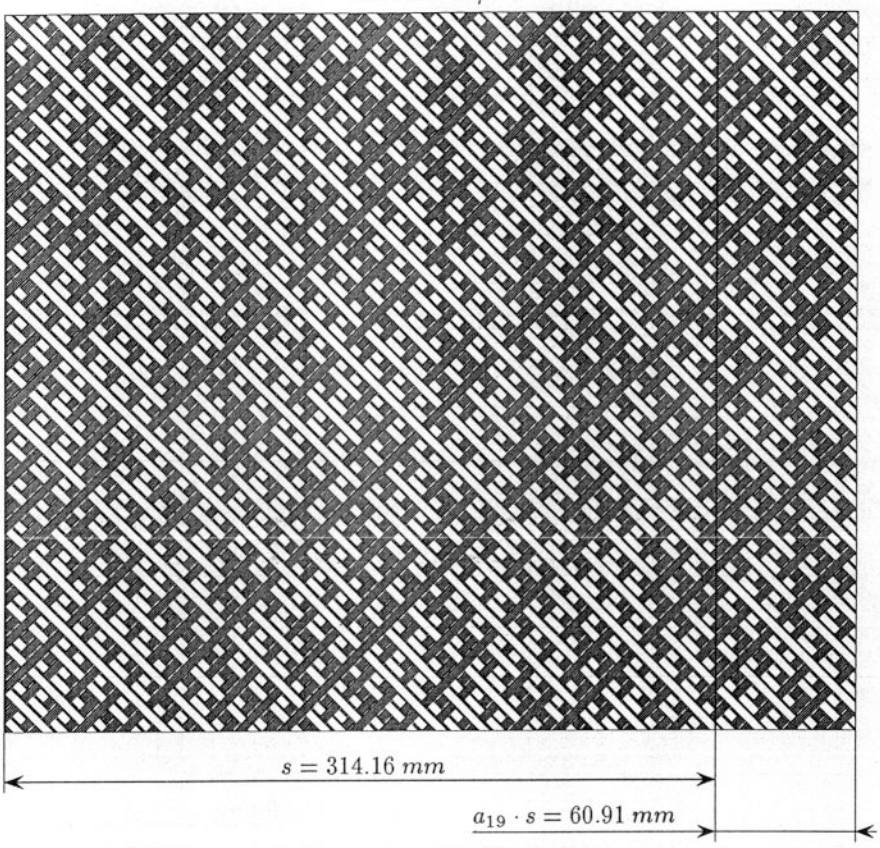
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/18



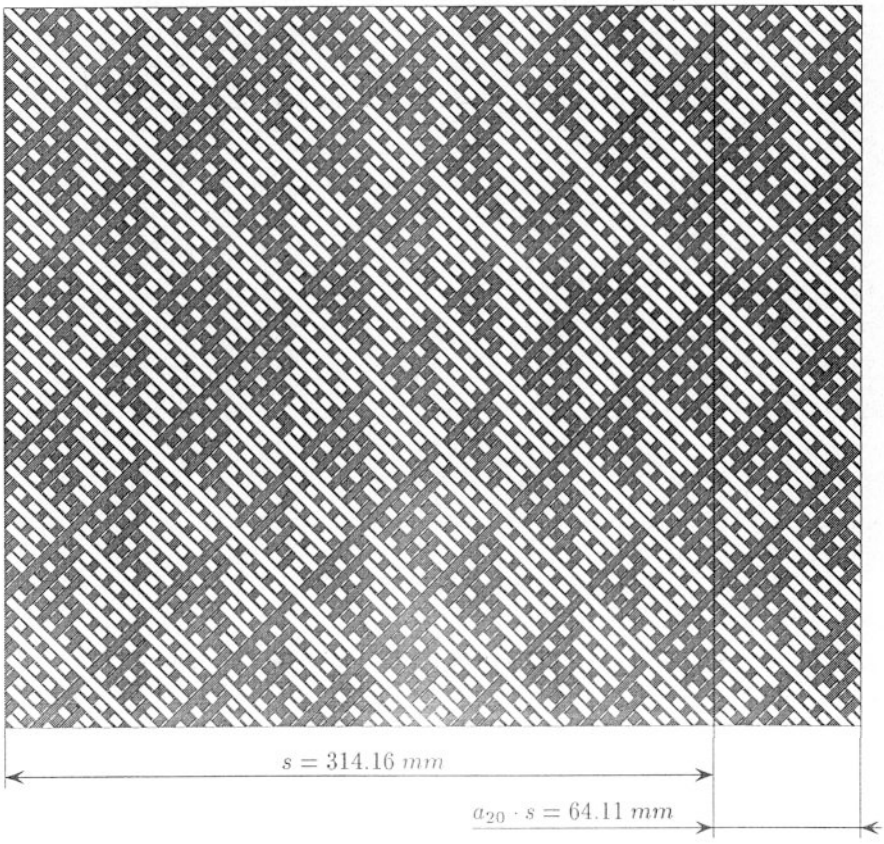
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/19



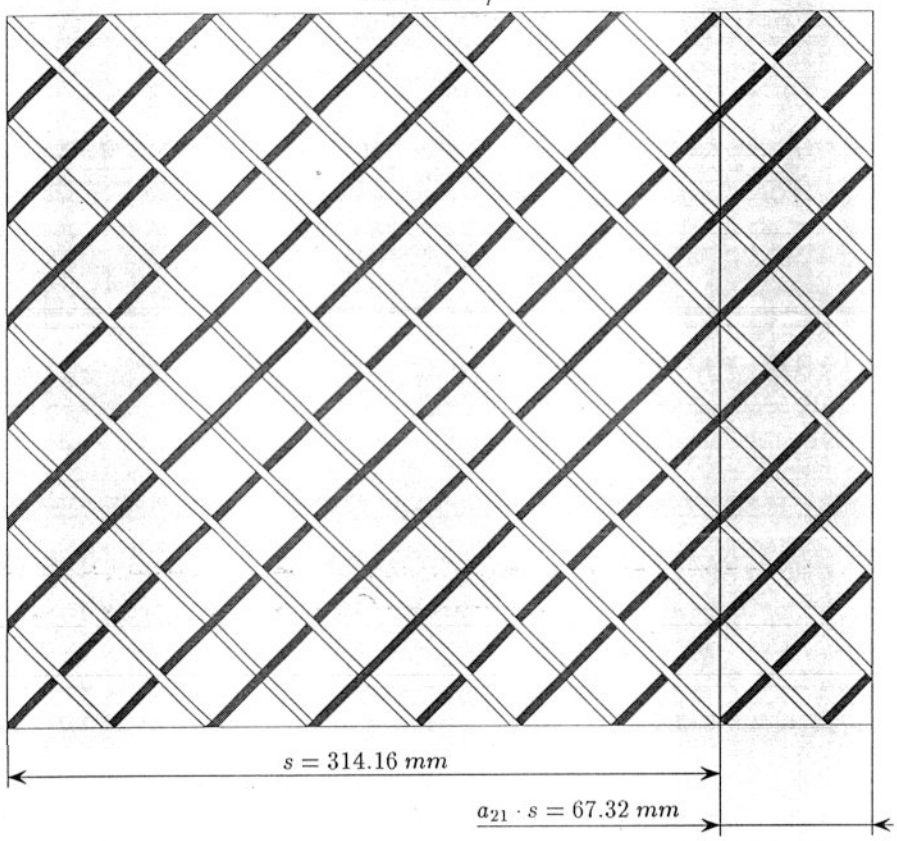
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/20



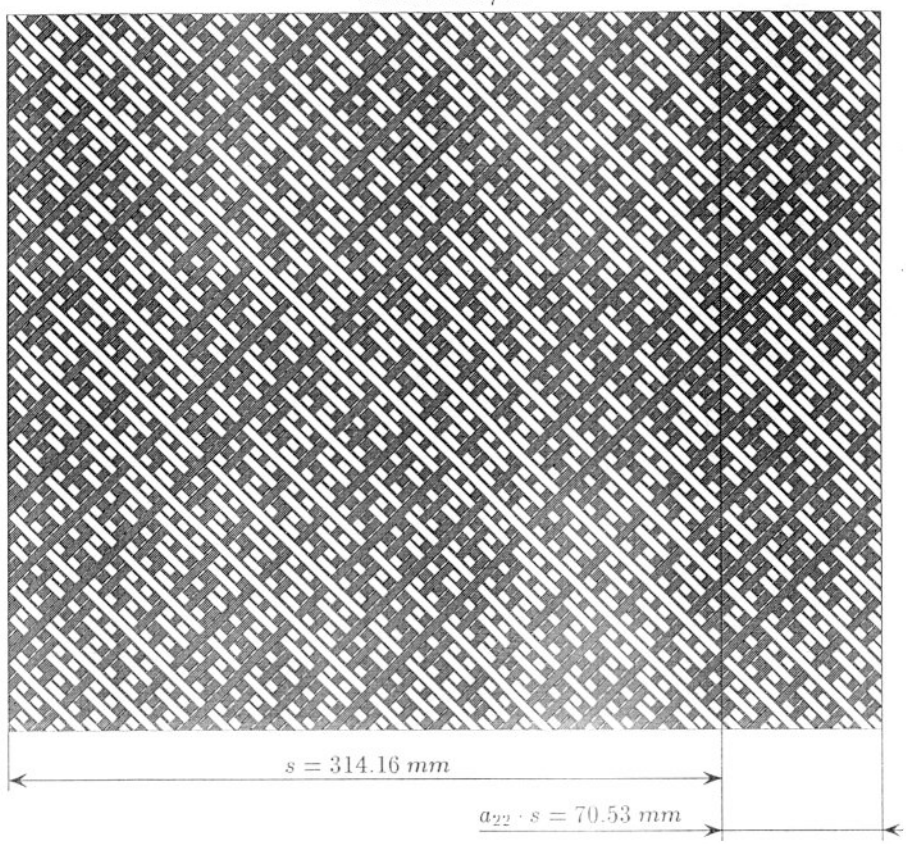
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/21



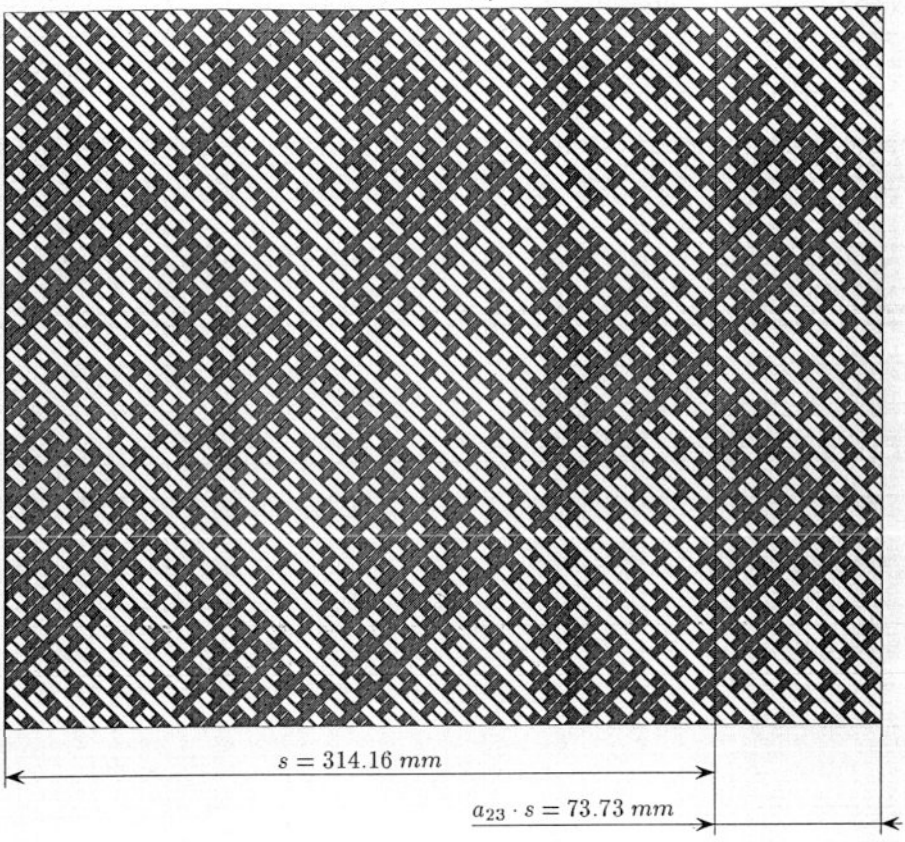
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/22



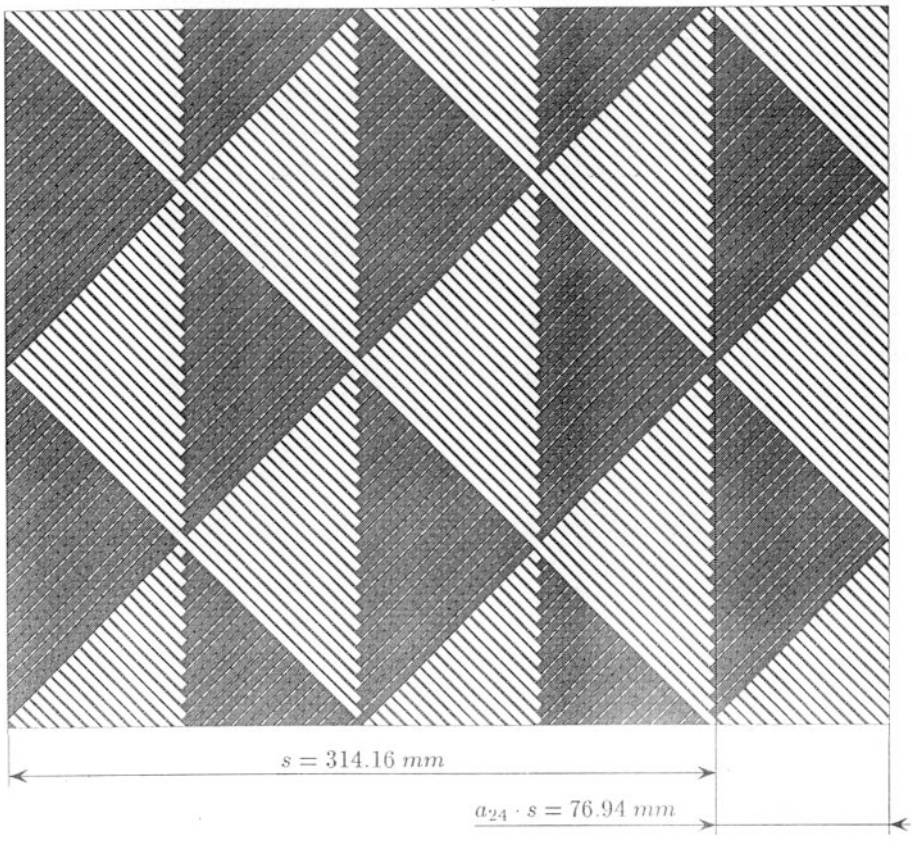
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 49/23



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

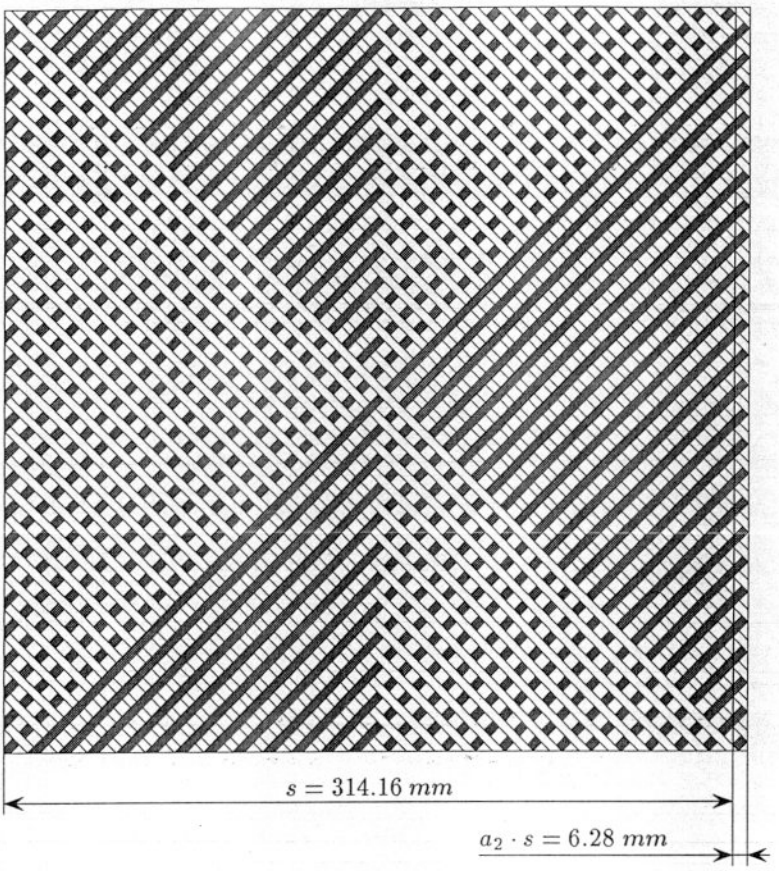
Tablica 49/24



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

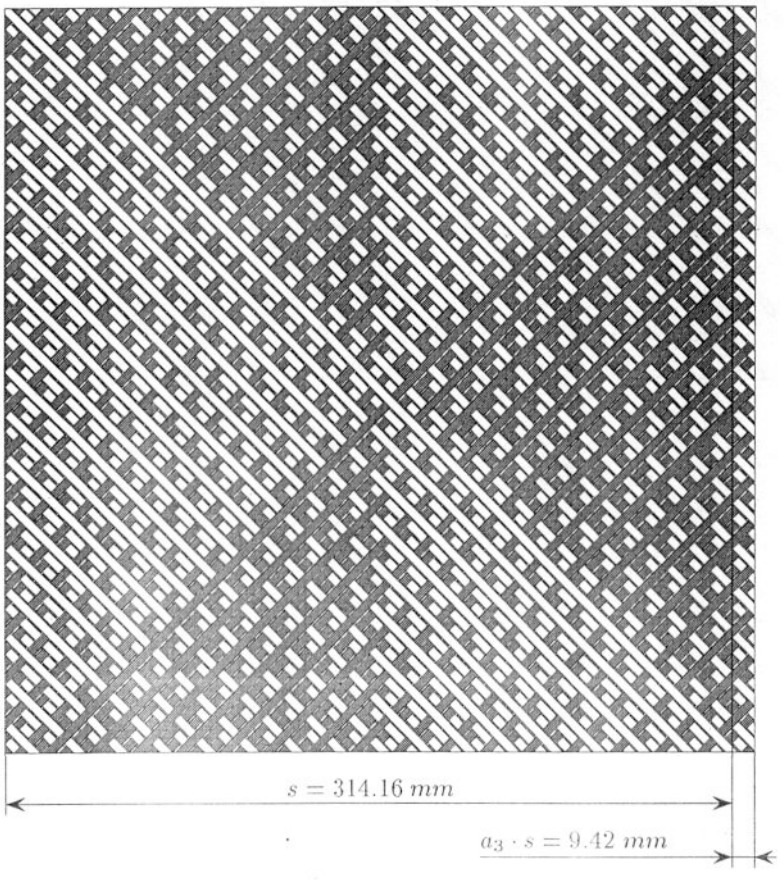
| Liczba wiązek rowingu: 50 | | |

Tablica 50/2



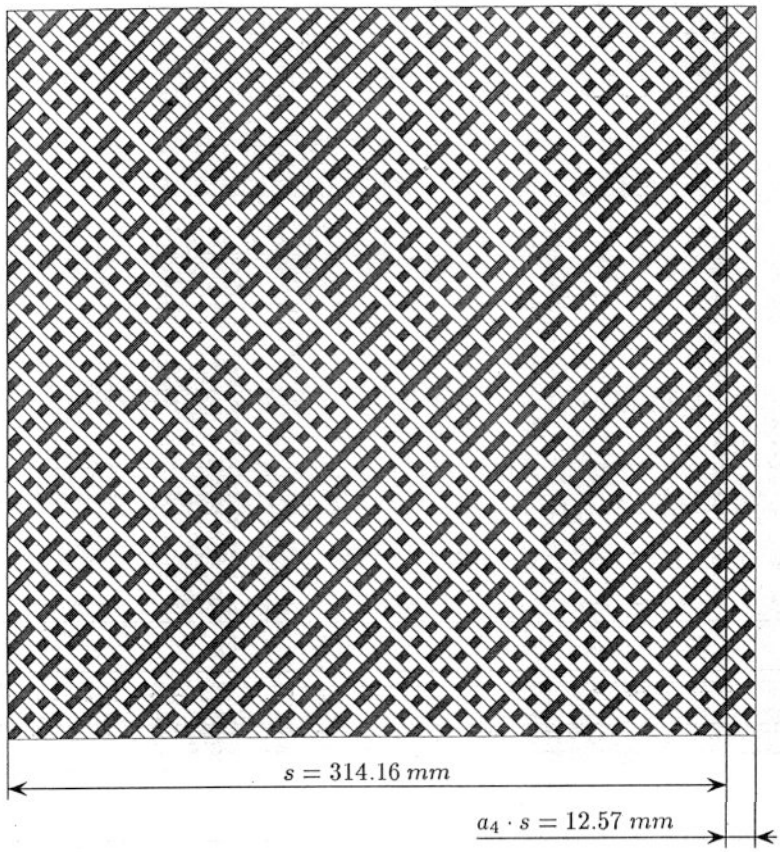
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/3



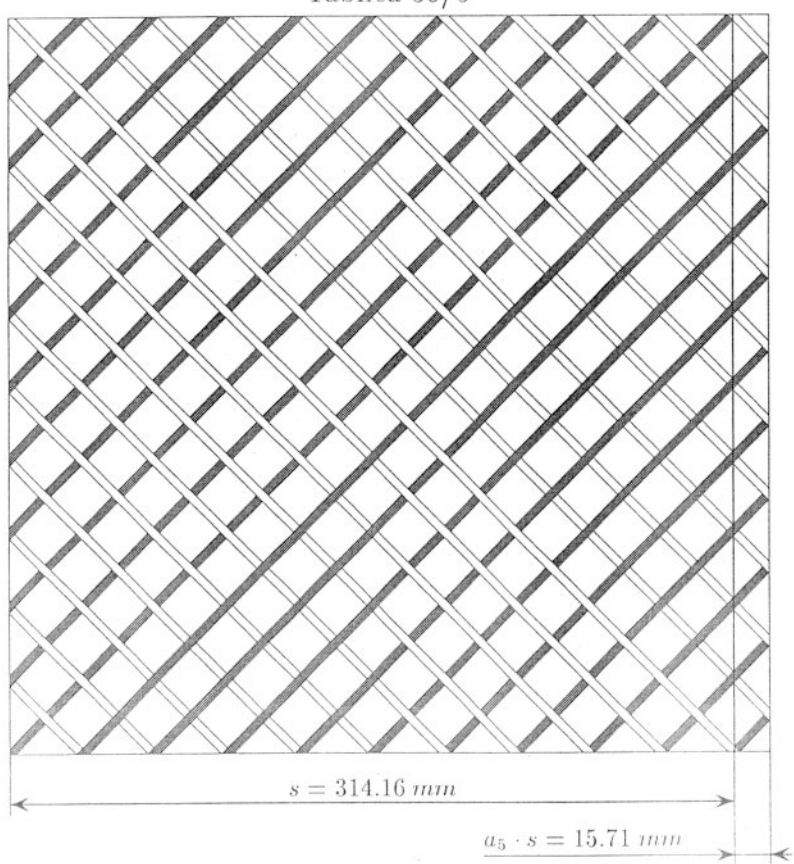
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/4



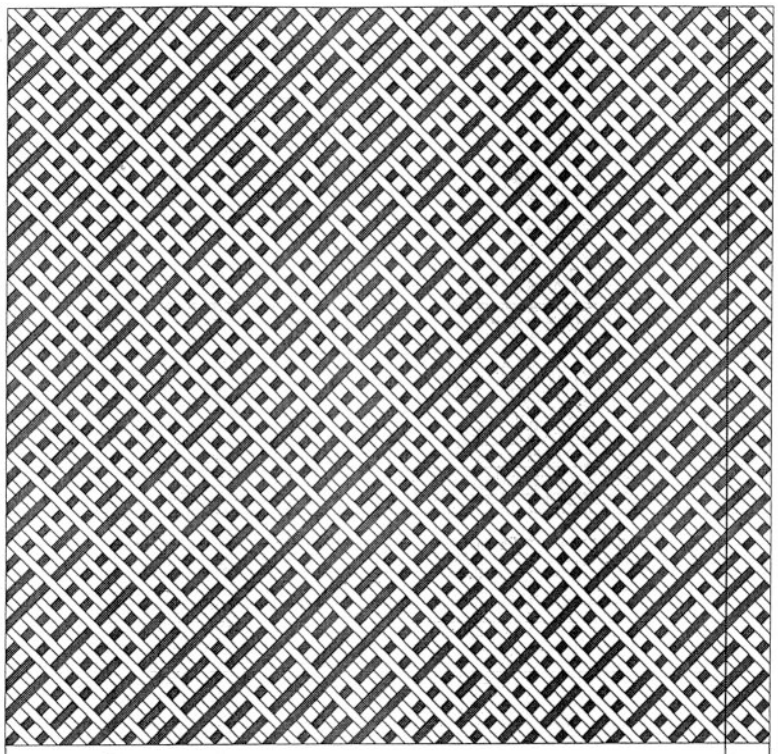
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/5



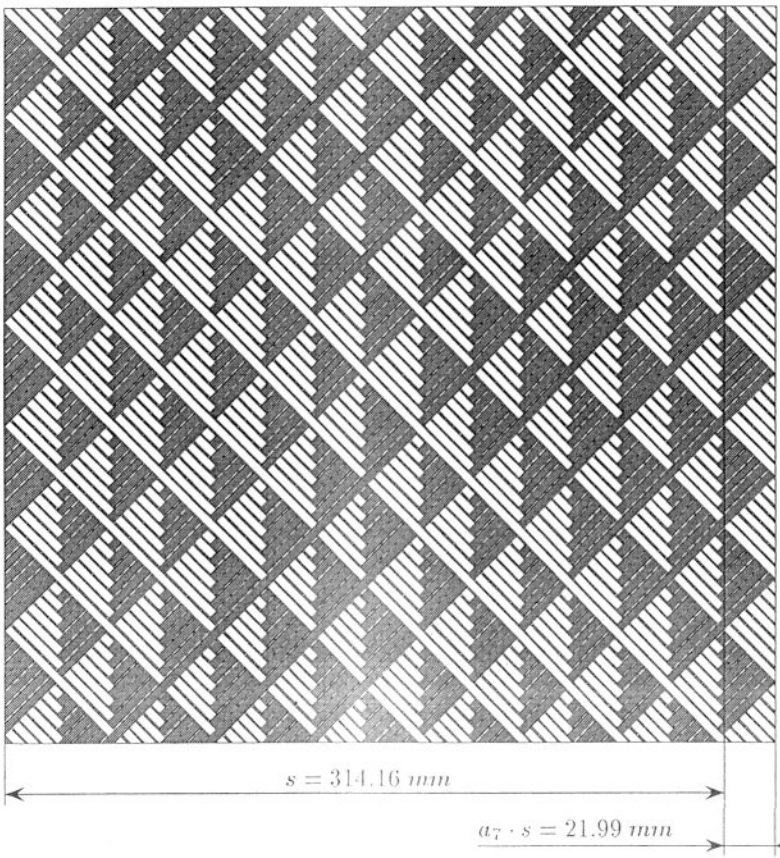
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/6



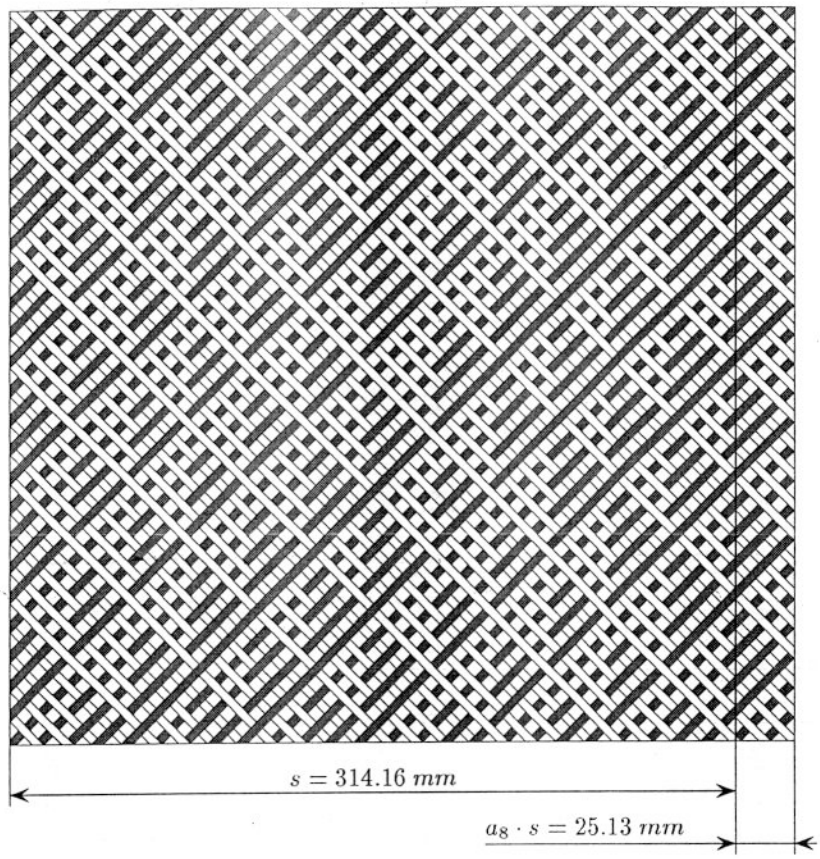
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/7



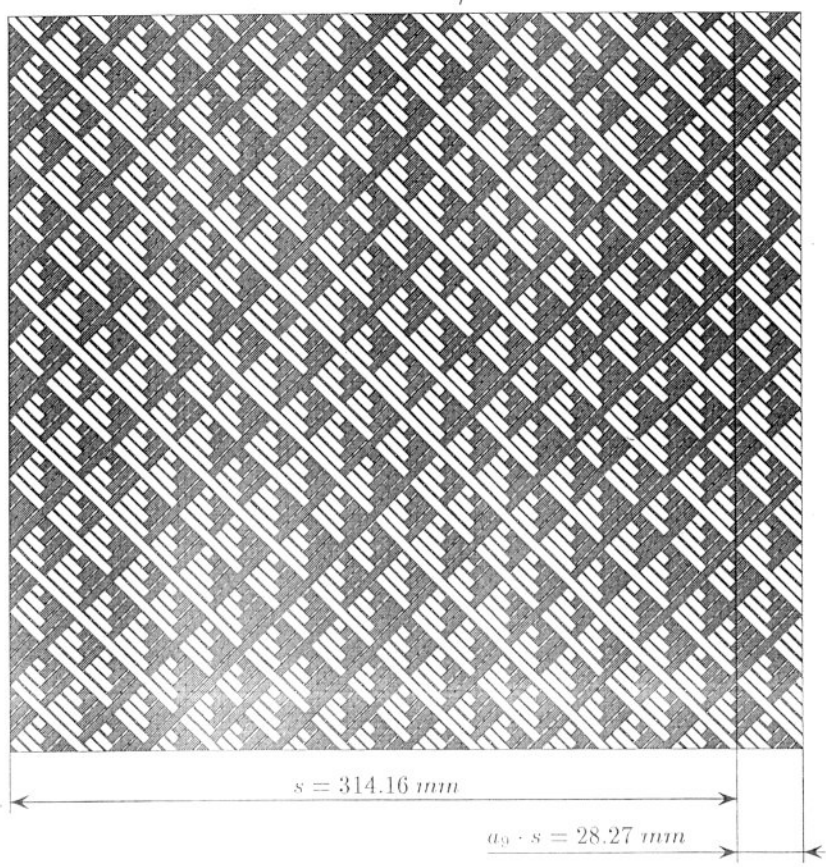
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/8



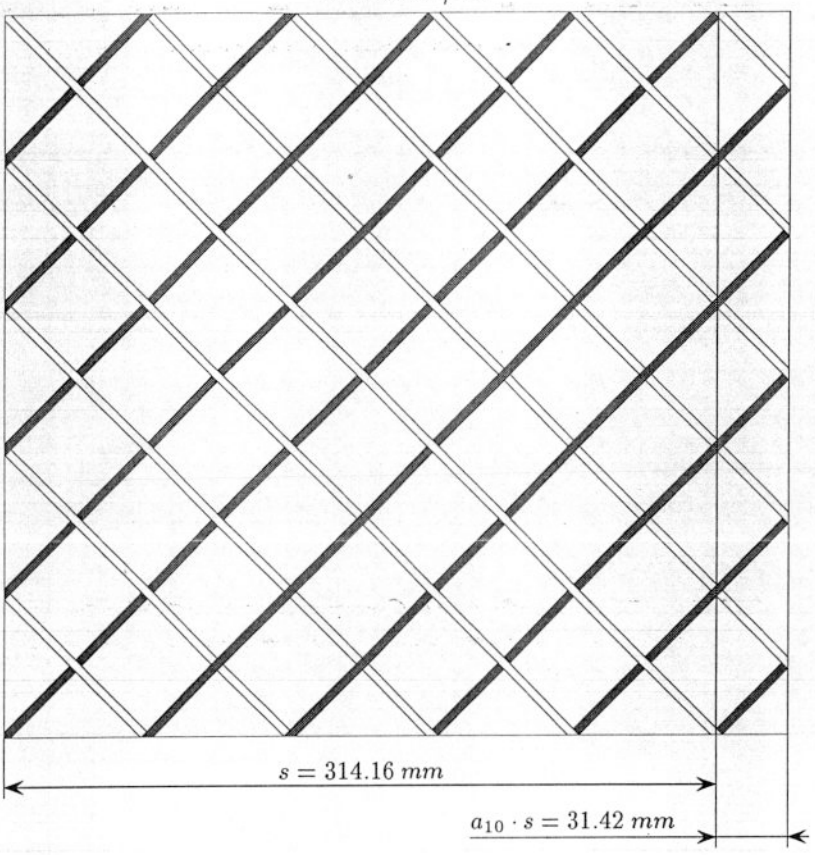
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/9



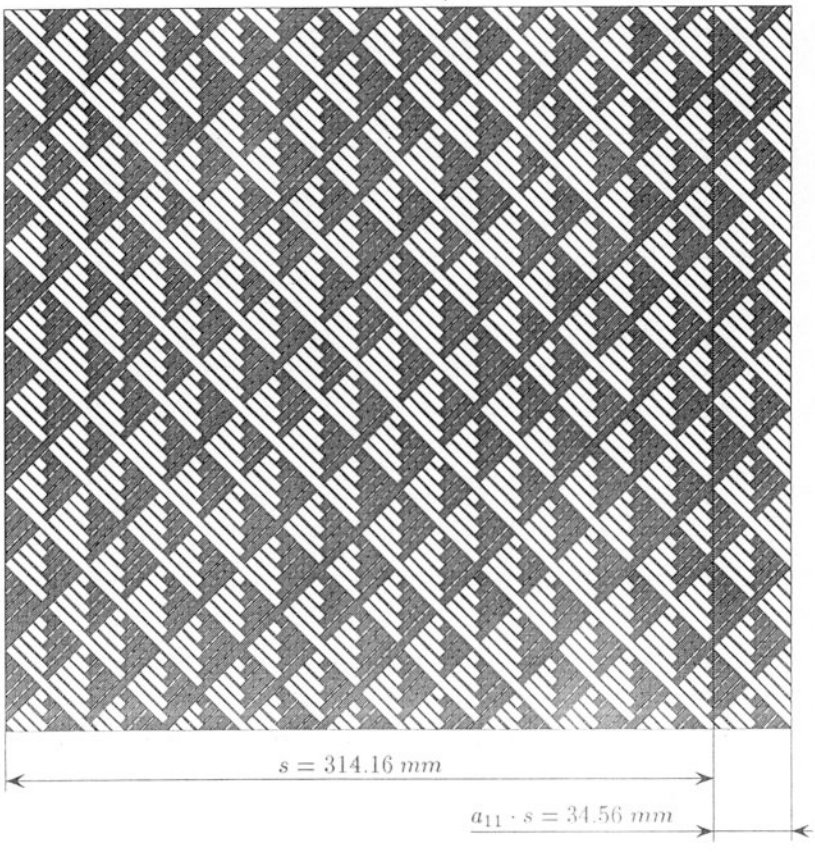
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/10



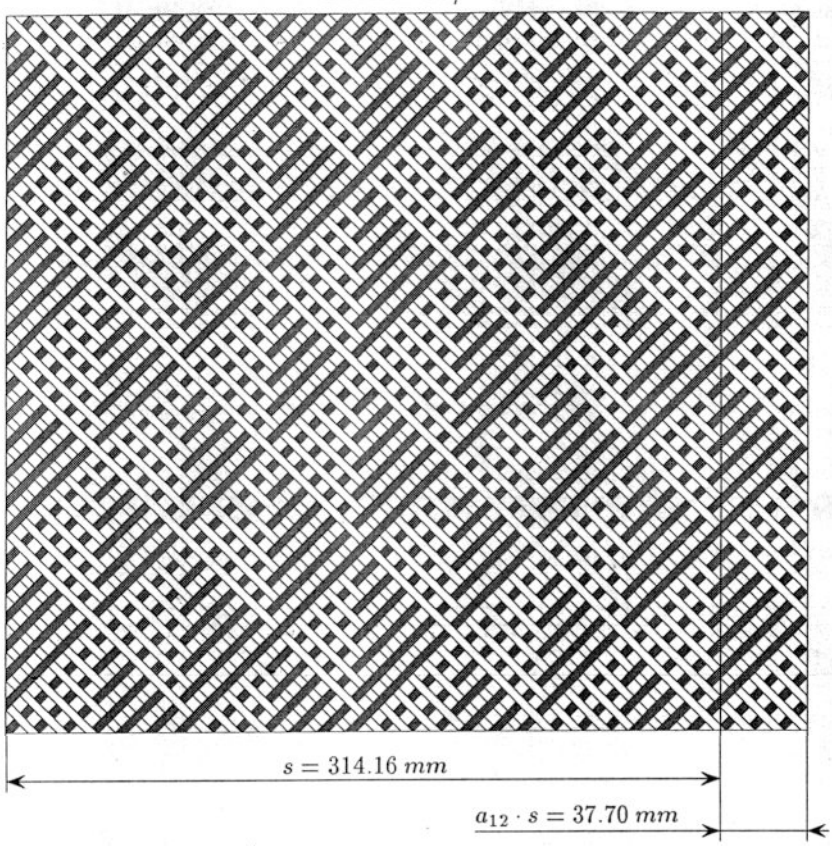
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/11



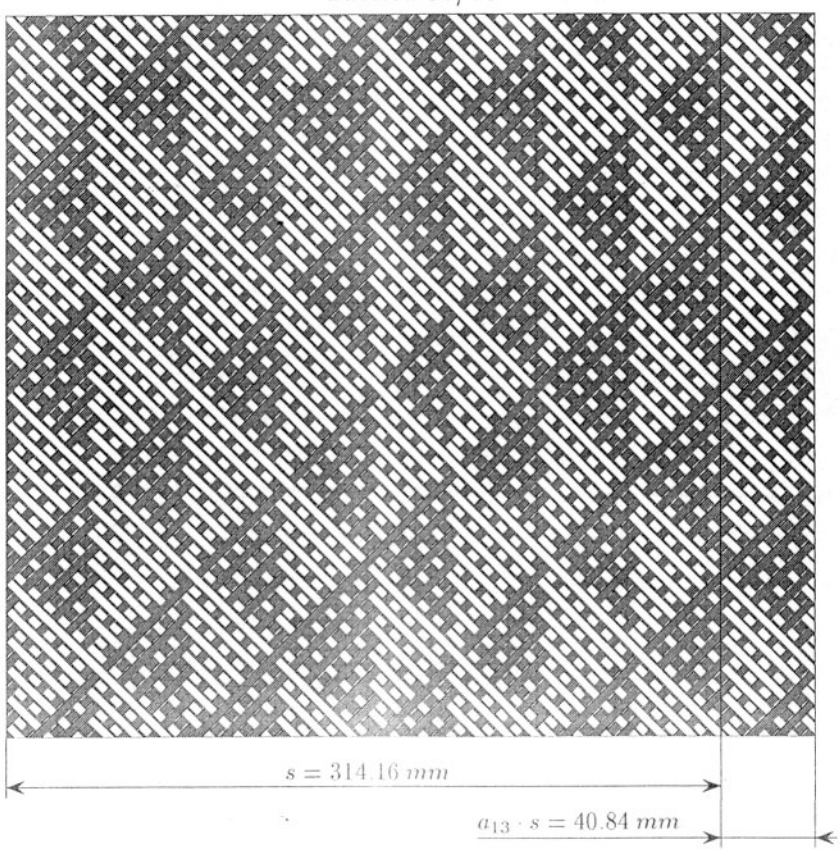
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/12



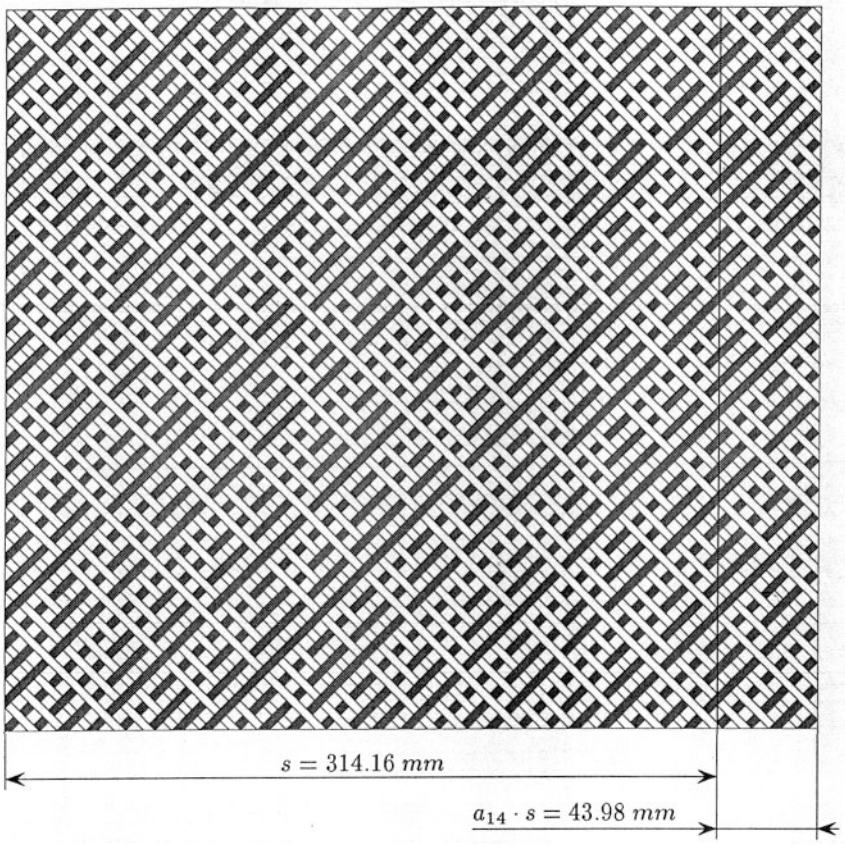
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/13



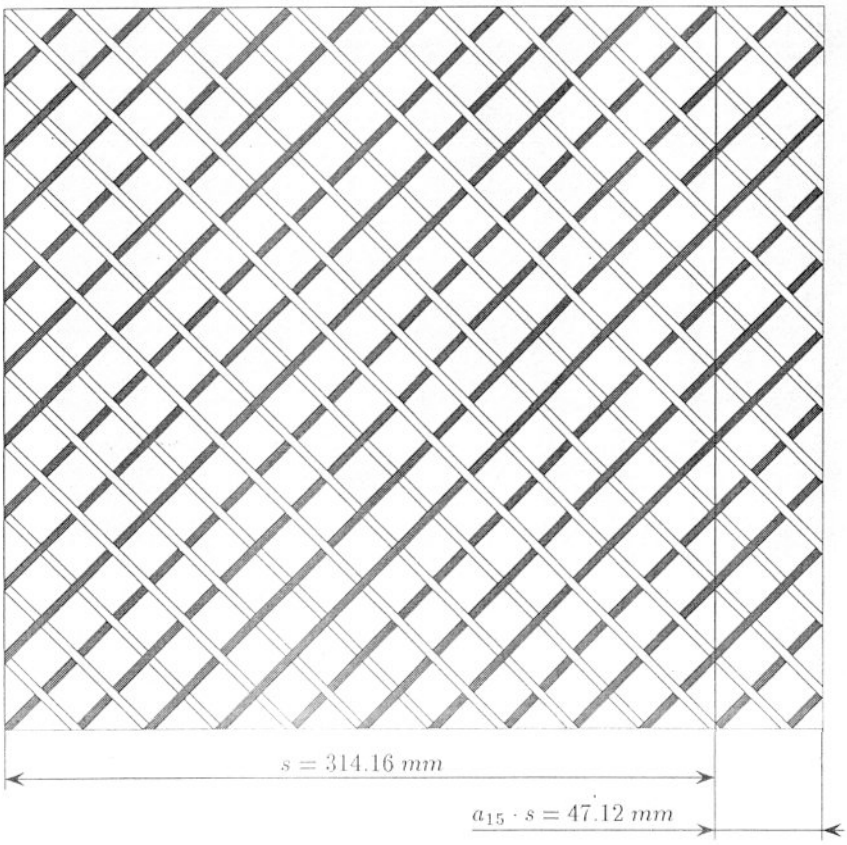
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/14



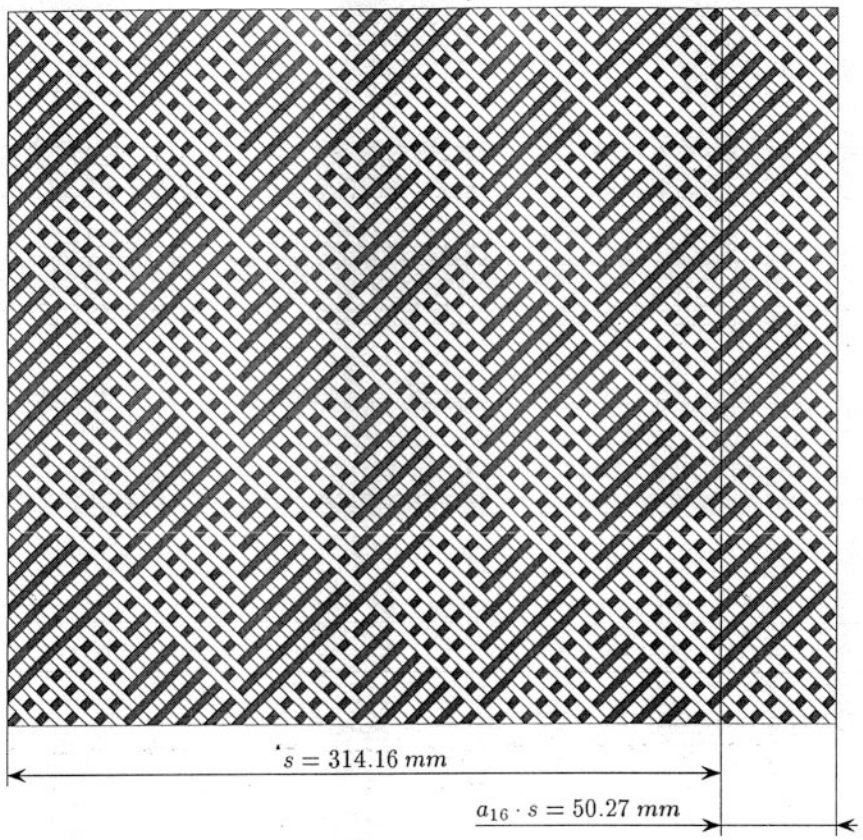
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/15



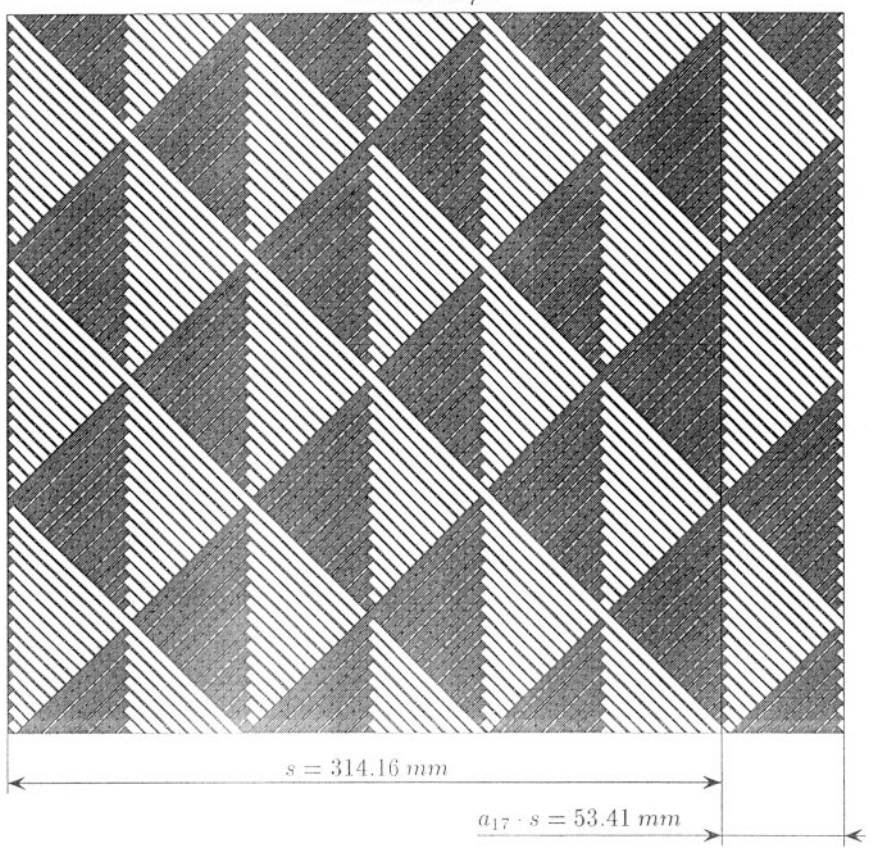
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/16



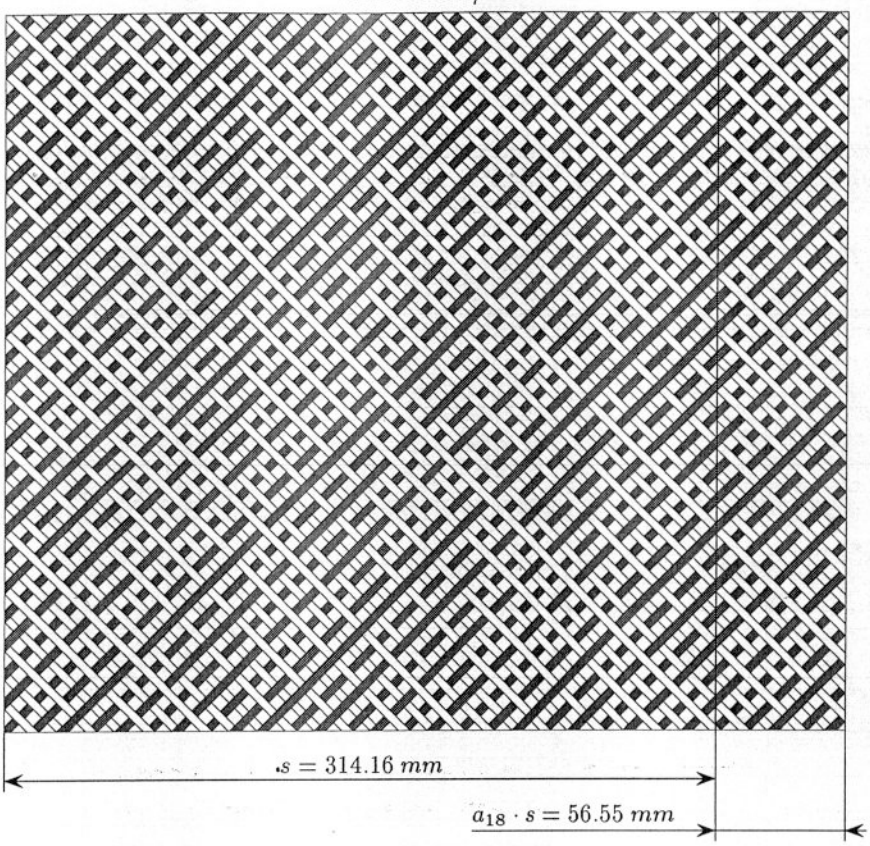
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/17



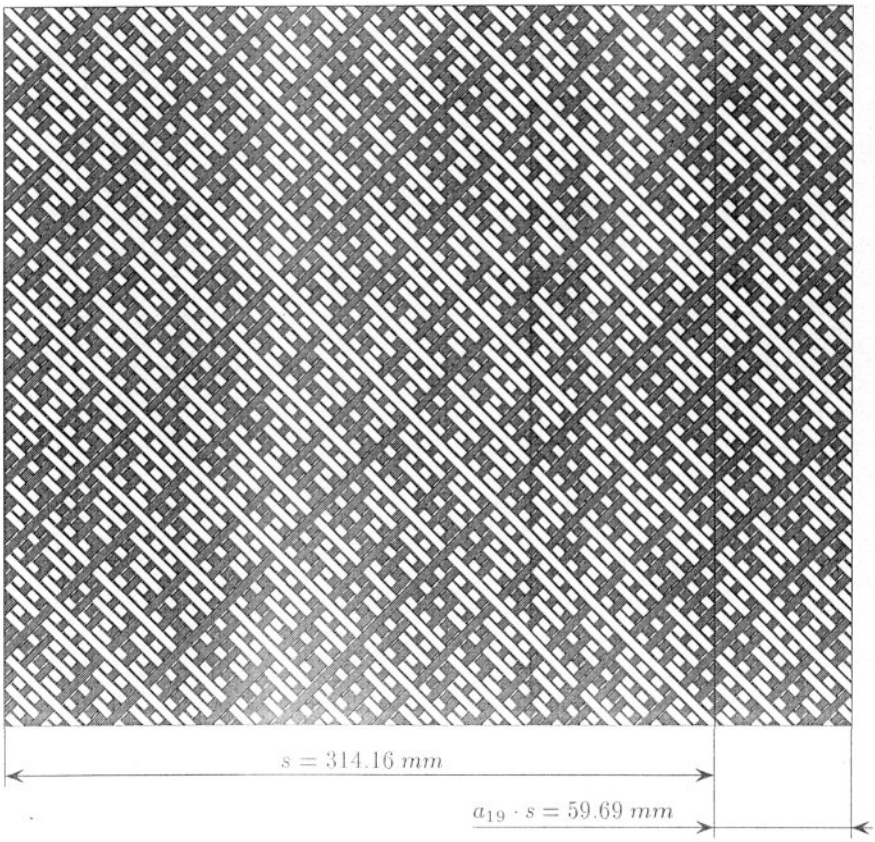
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/18



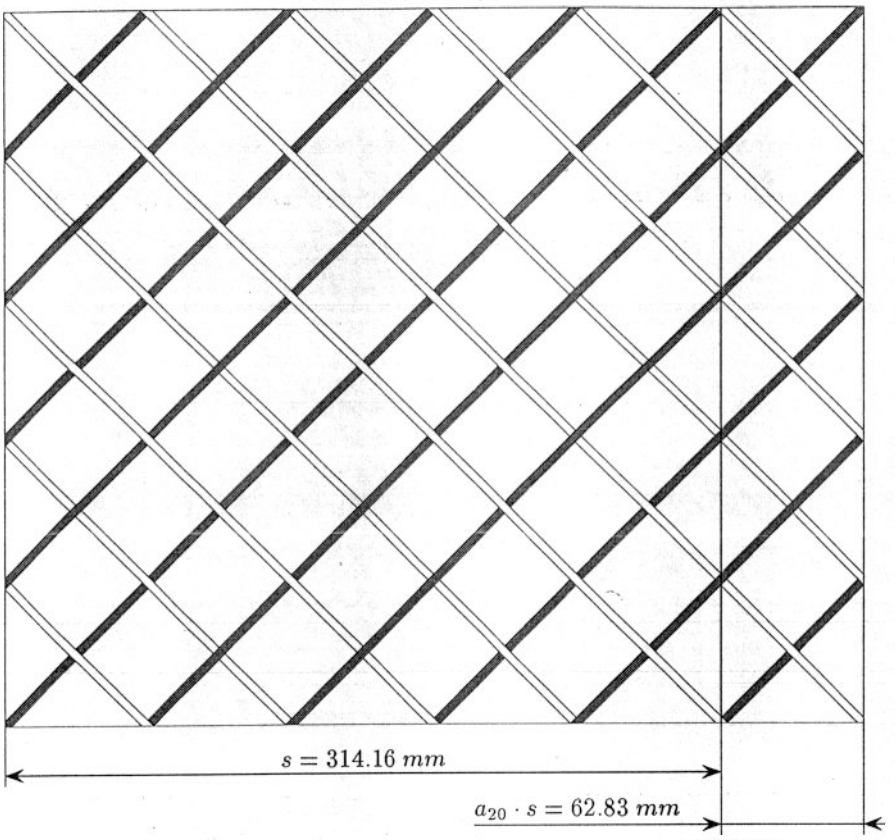
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/19



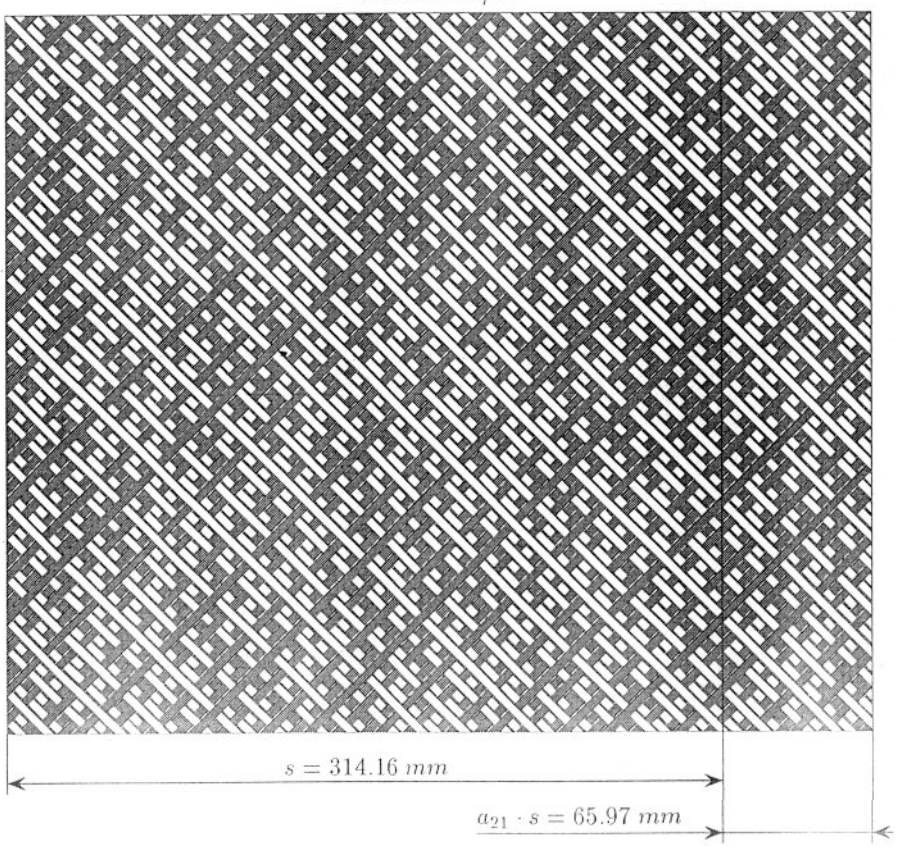
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/20



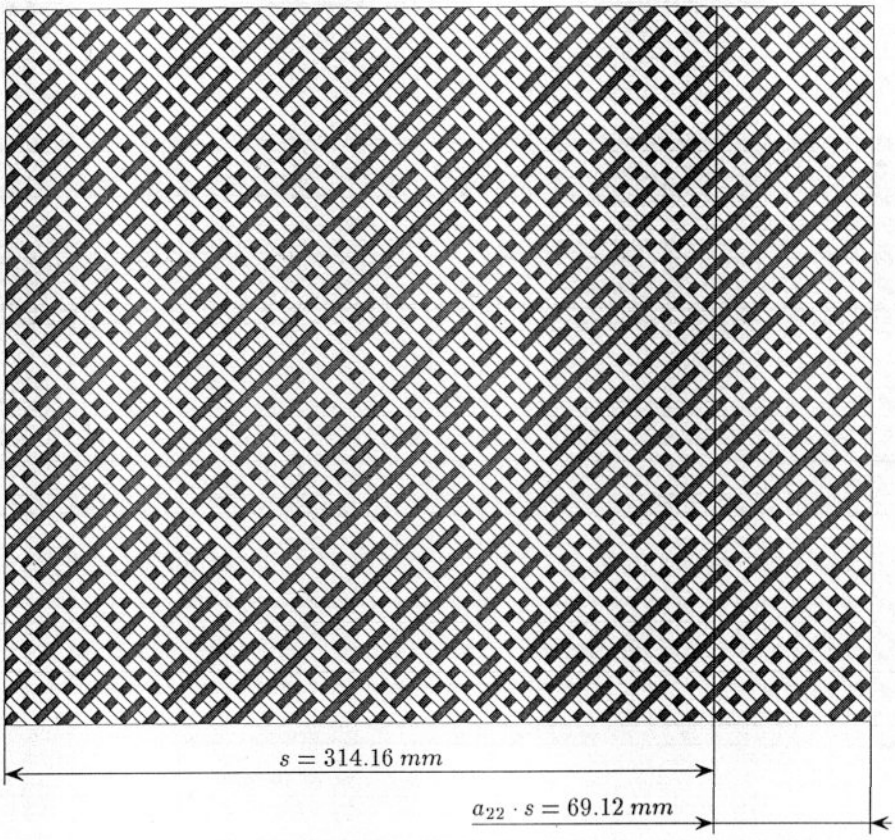
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/21



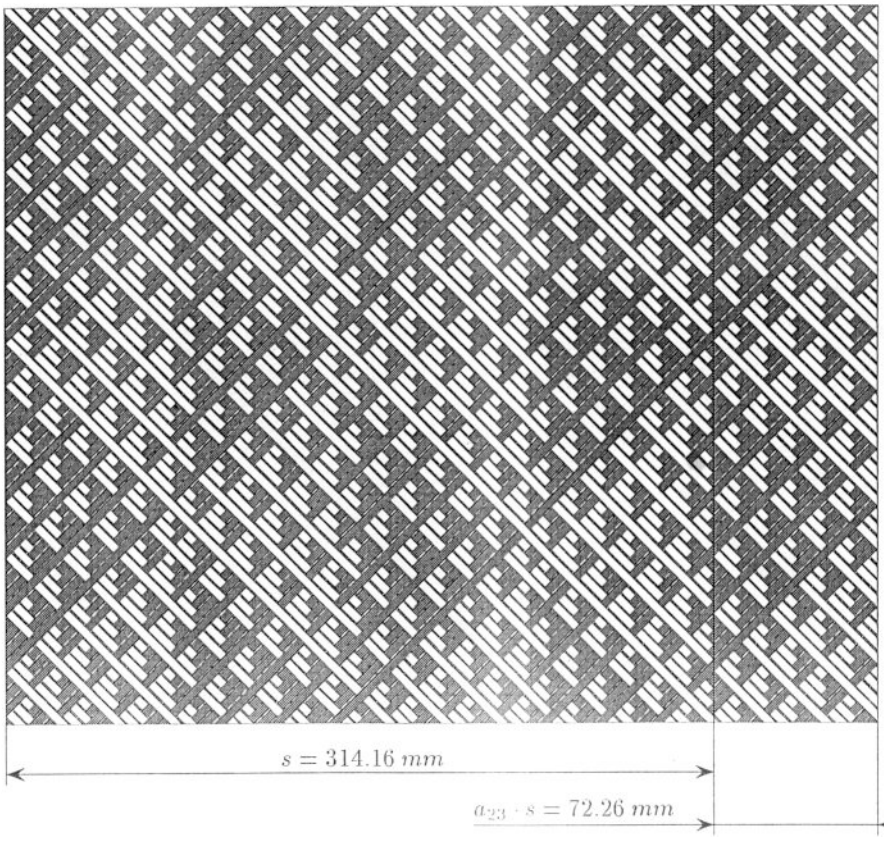
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/22



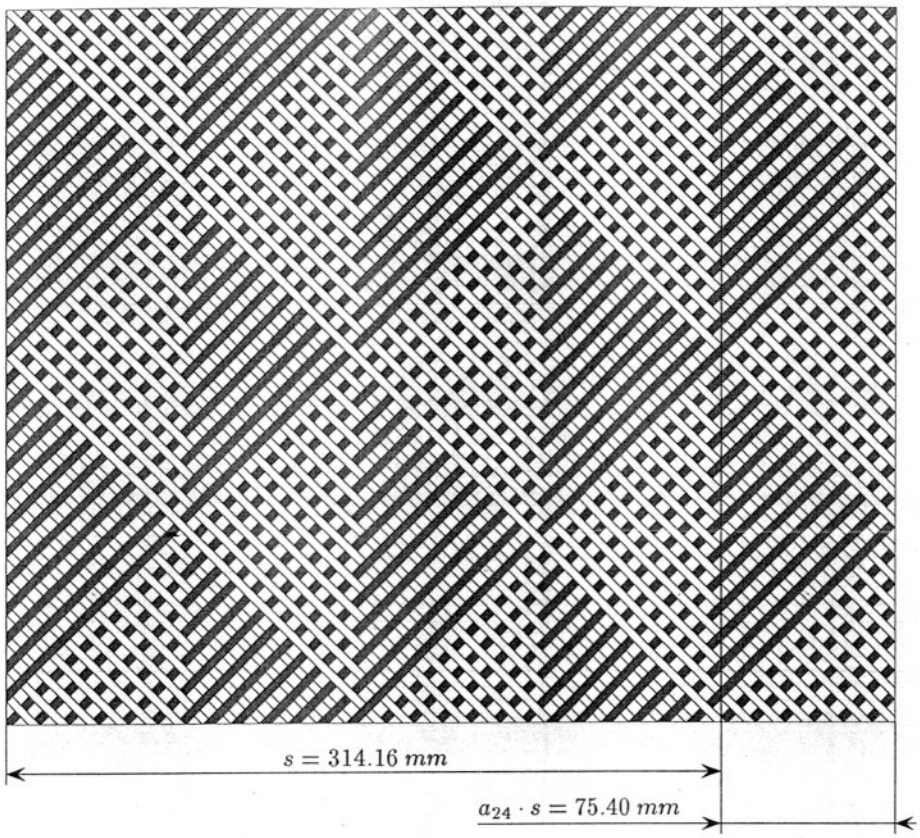
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/23



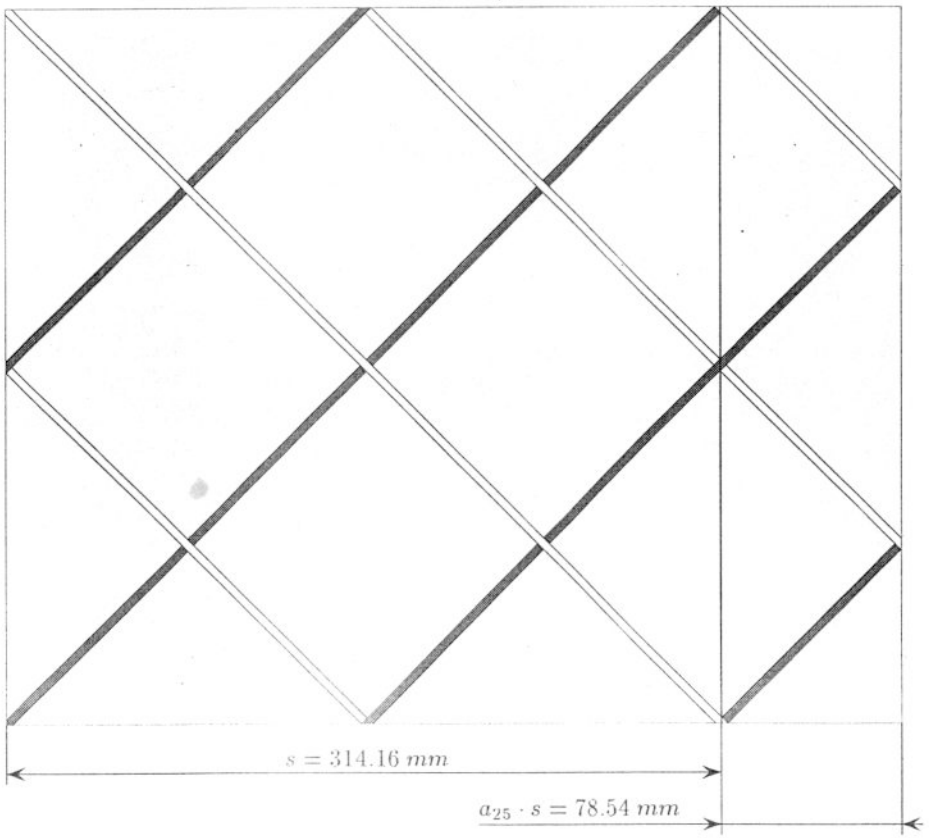
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 50/24



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

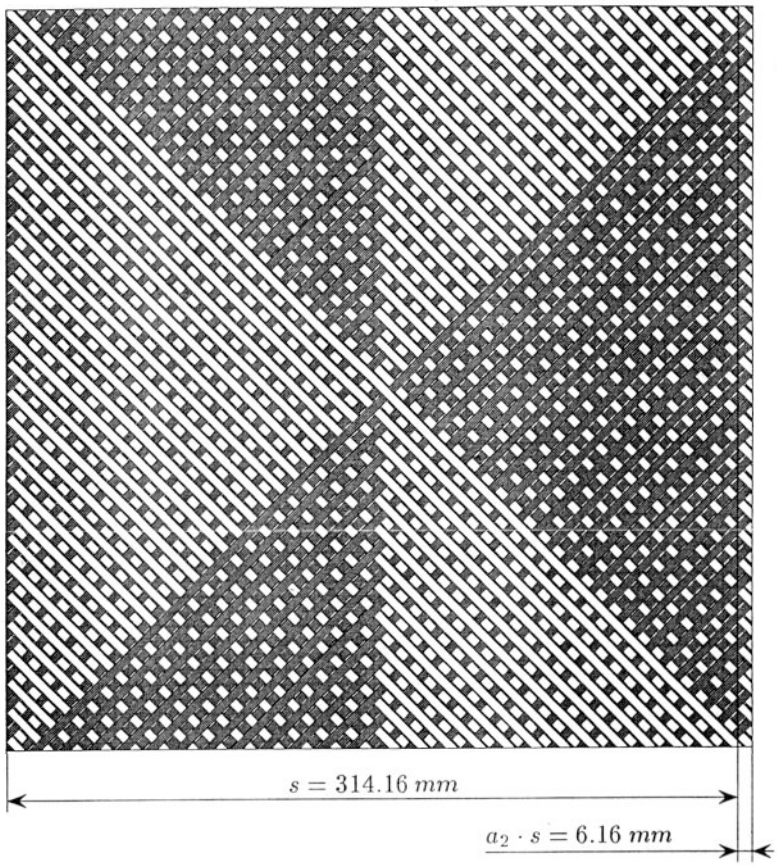
Tablica 50/25



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

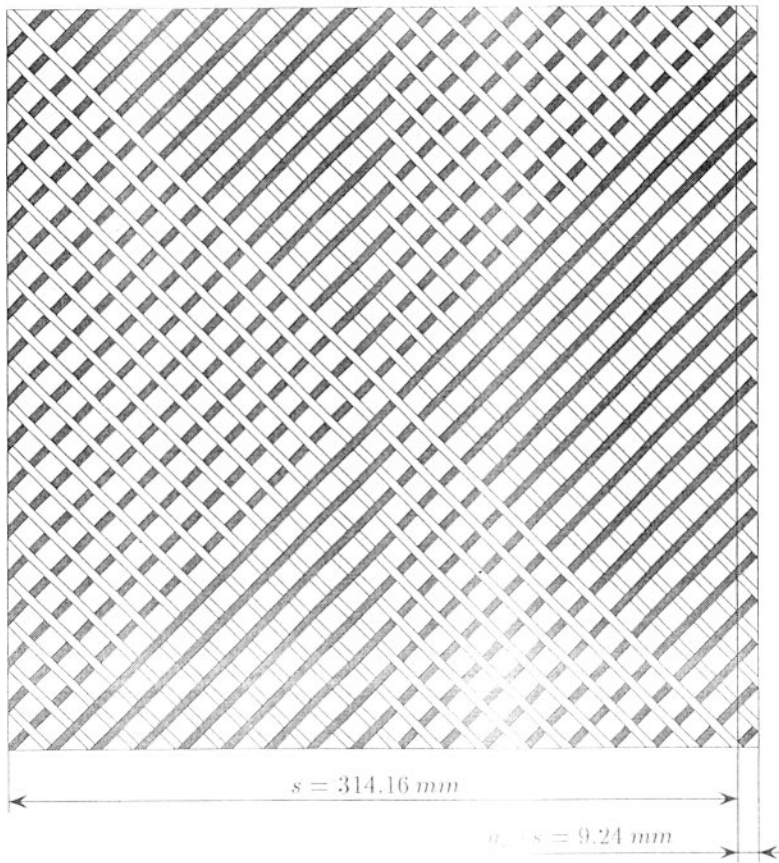
| Liczba wiązek rowingu: 51 | | |

Tablica 51/2



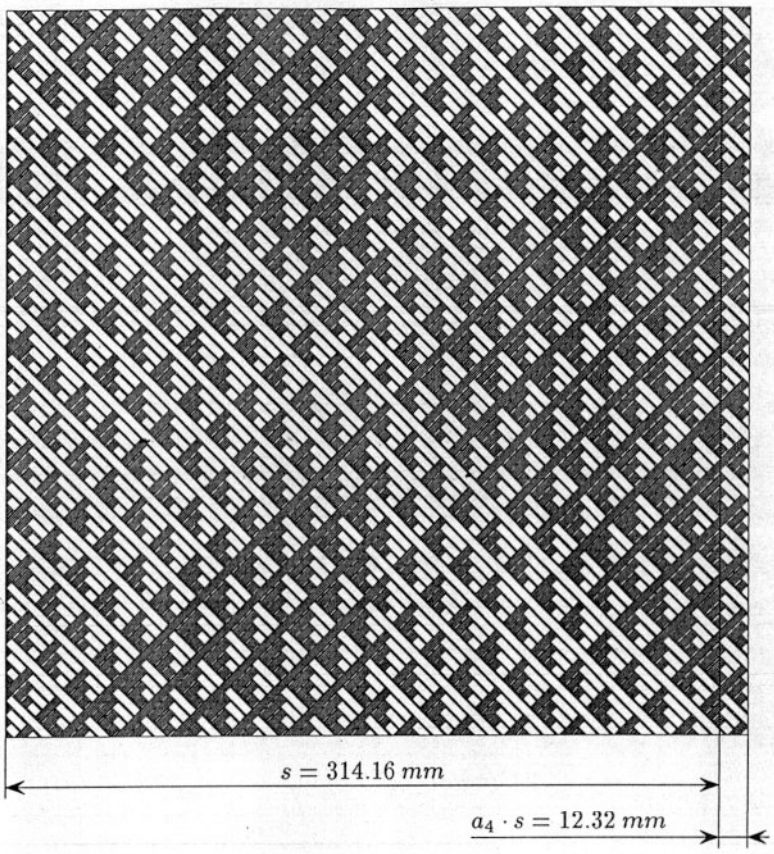
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/3



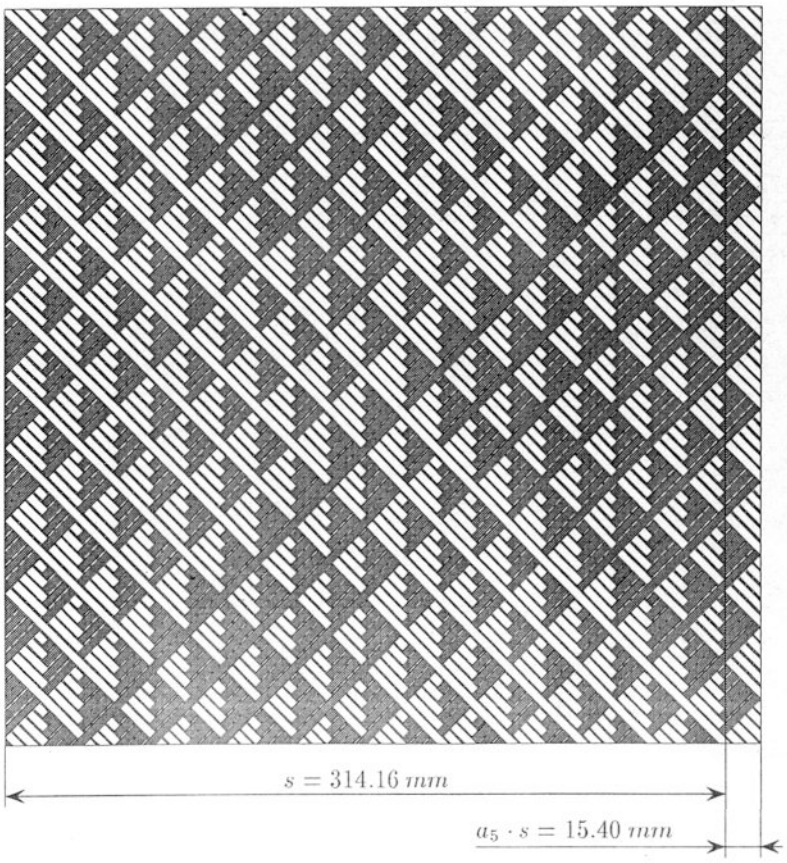
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/4



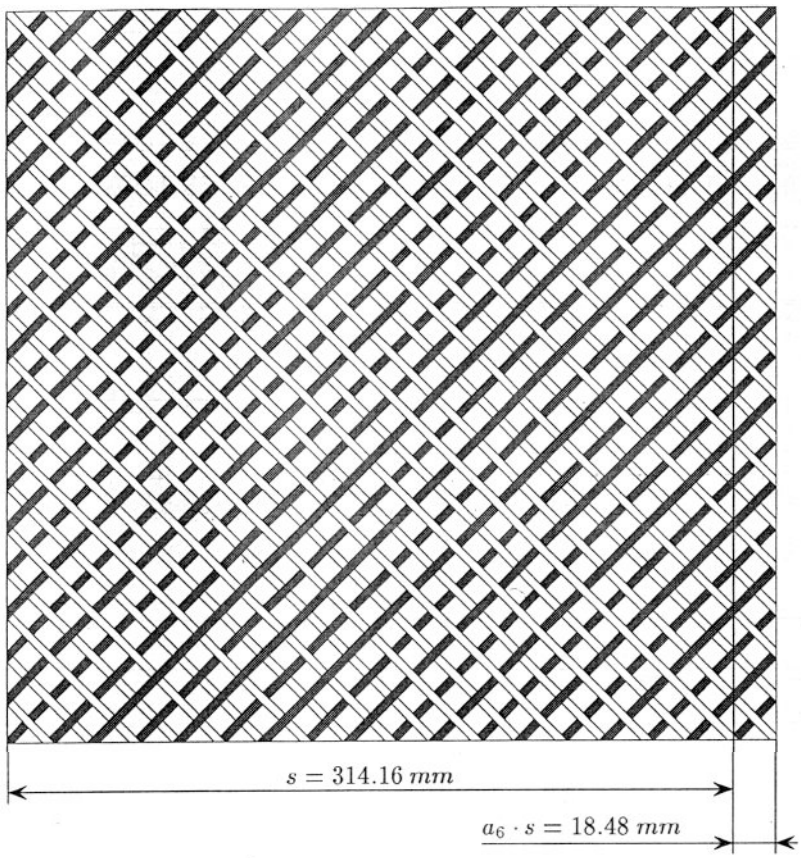
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/5



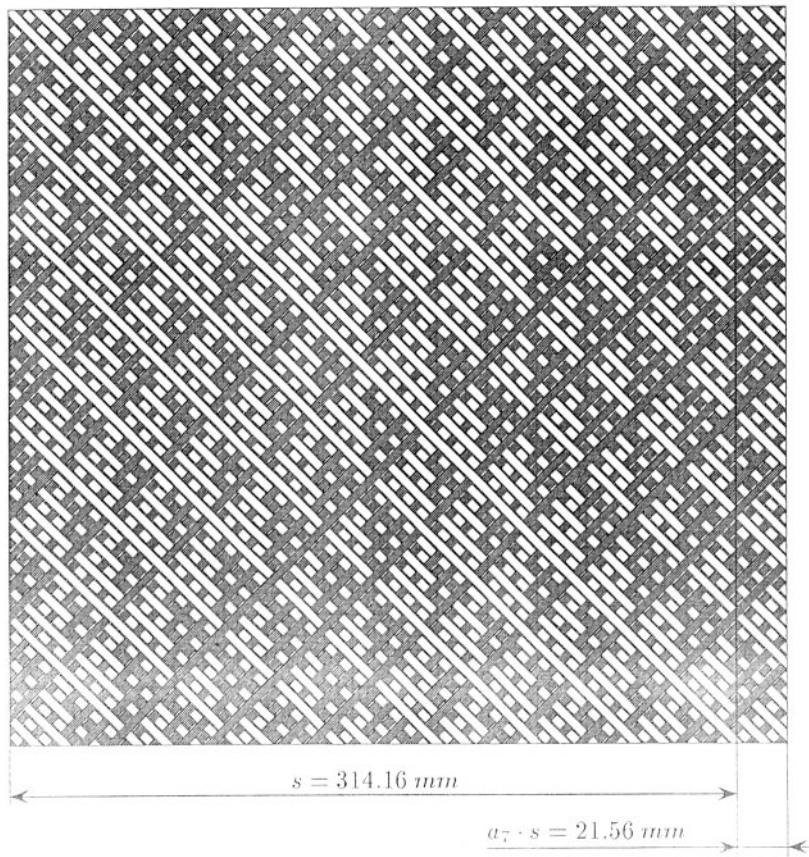
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/6



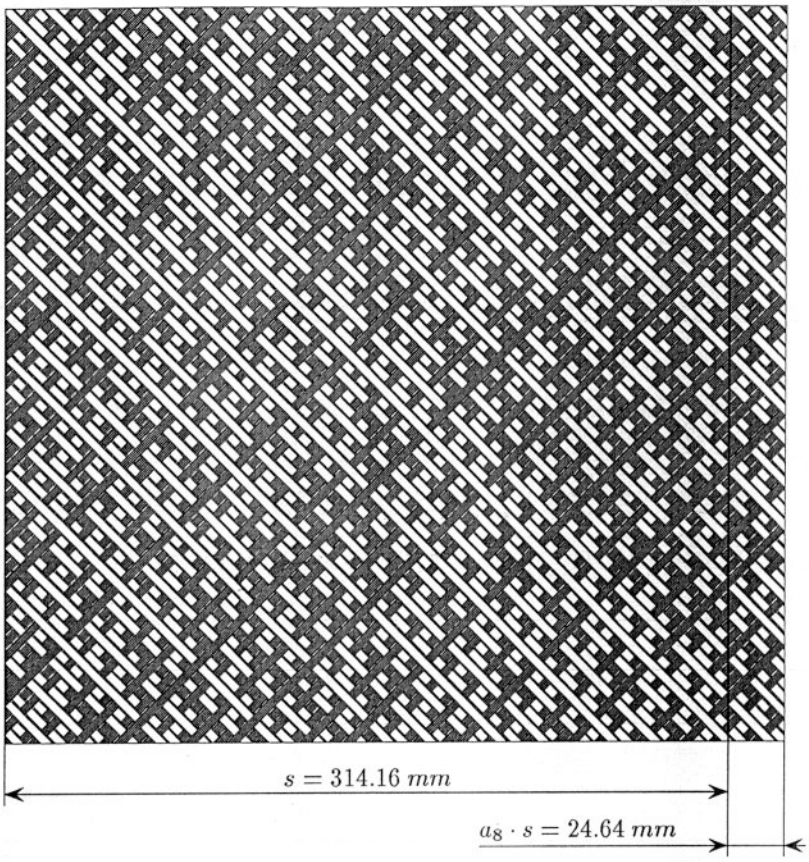
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/7



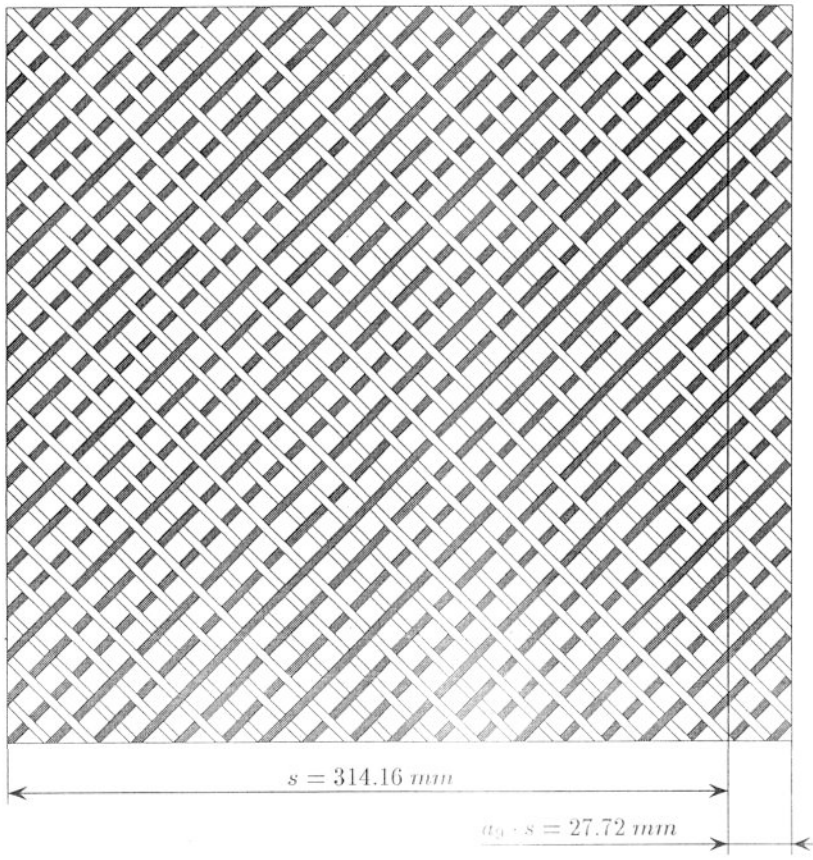
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 15.00°$

Tablica 51/8



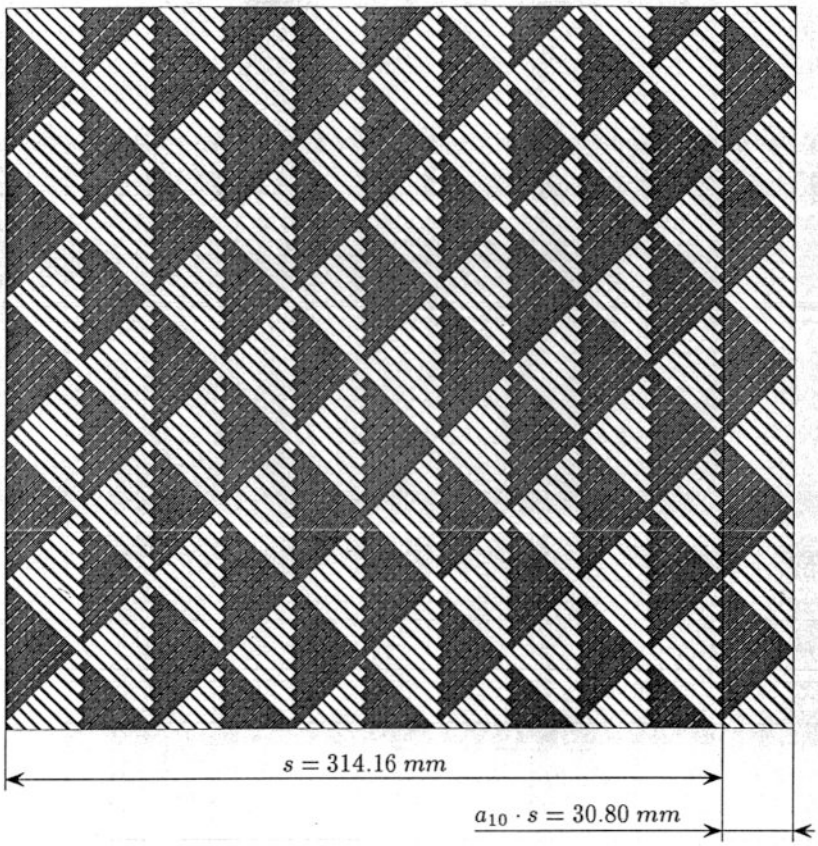
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/9



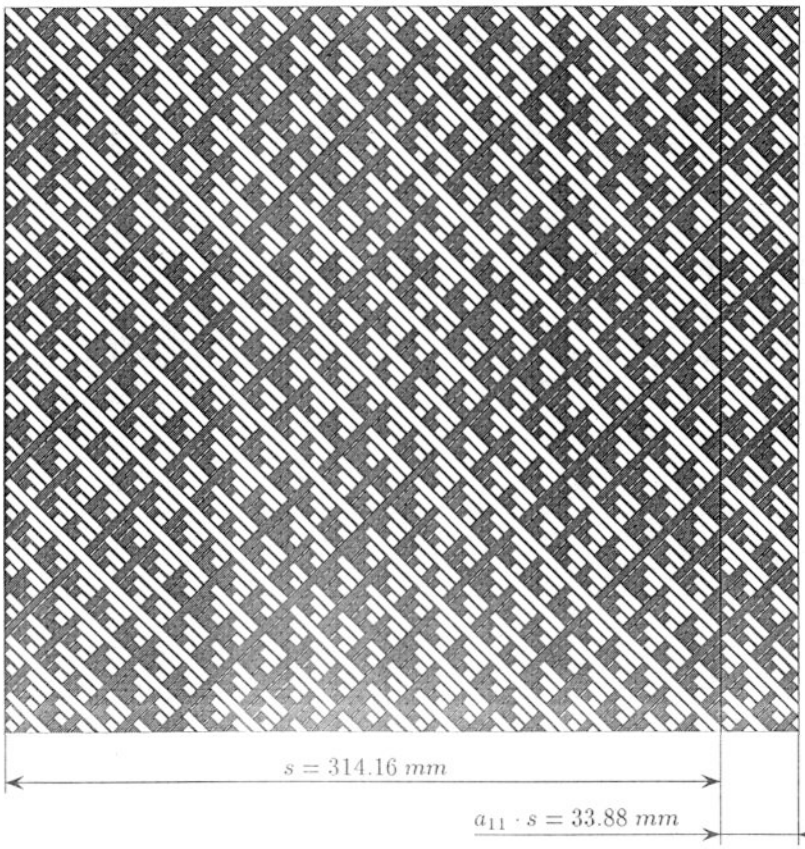
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/10



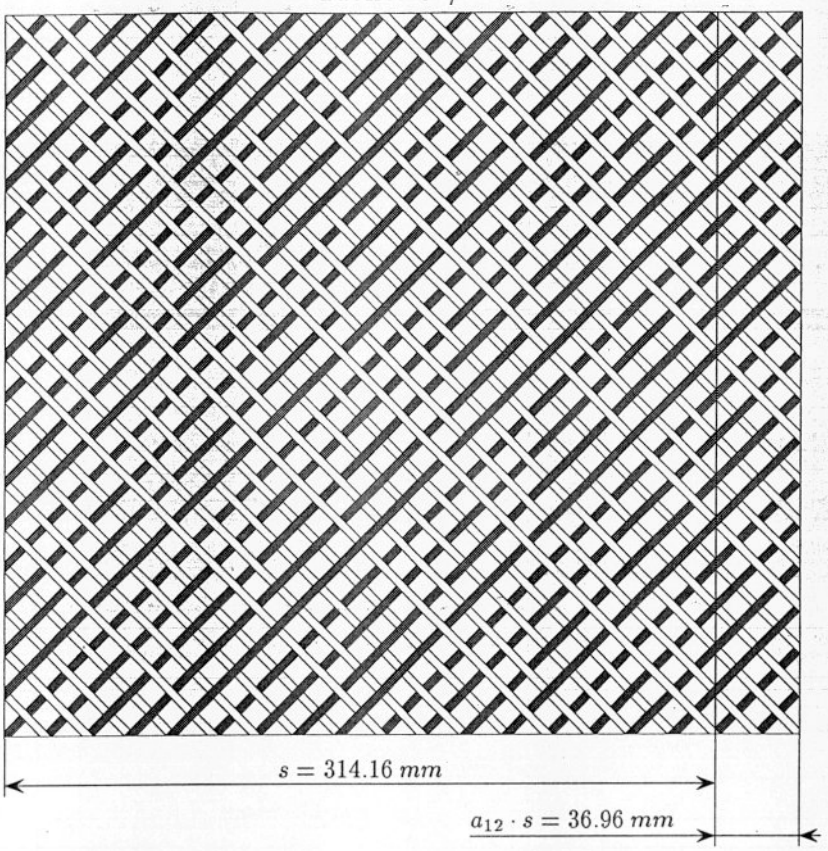
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/11



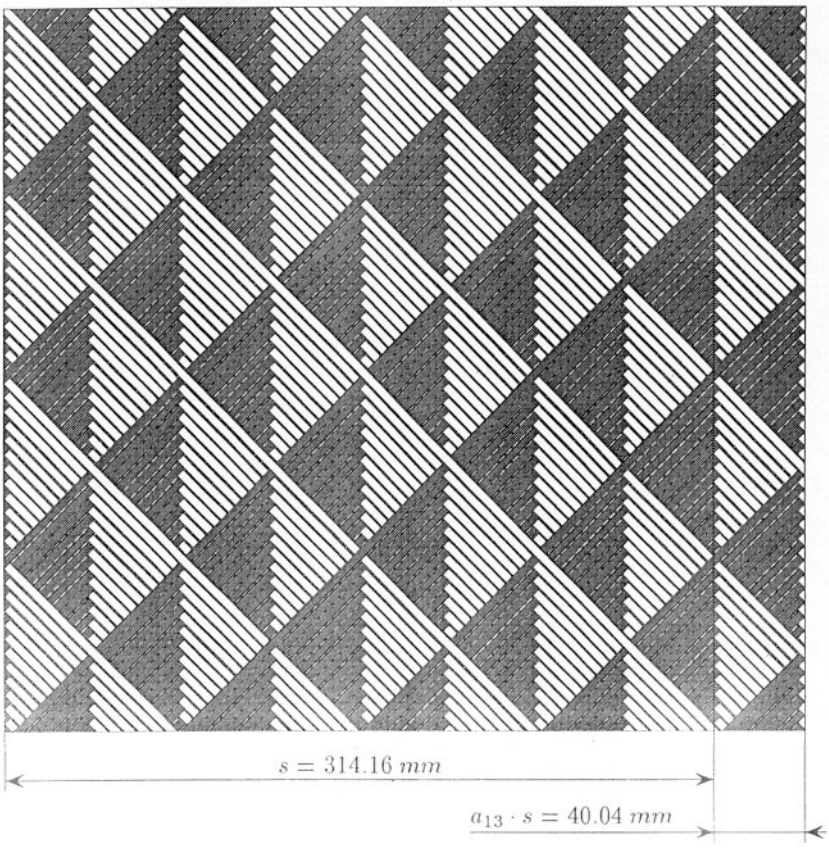
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/12



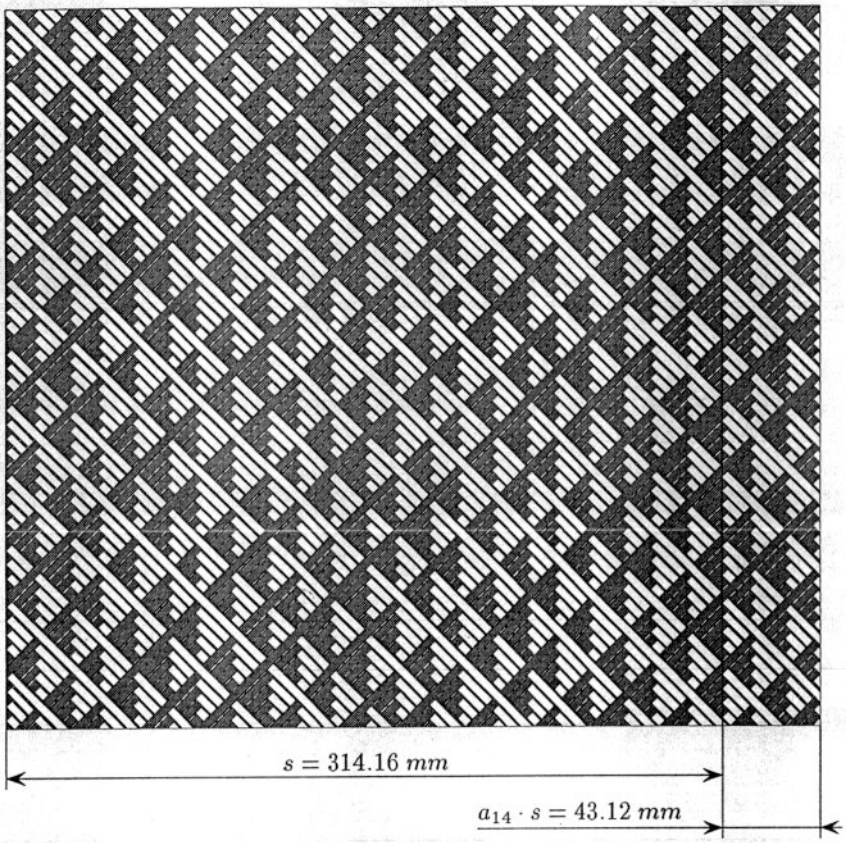
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/13



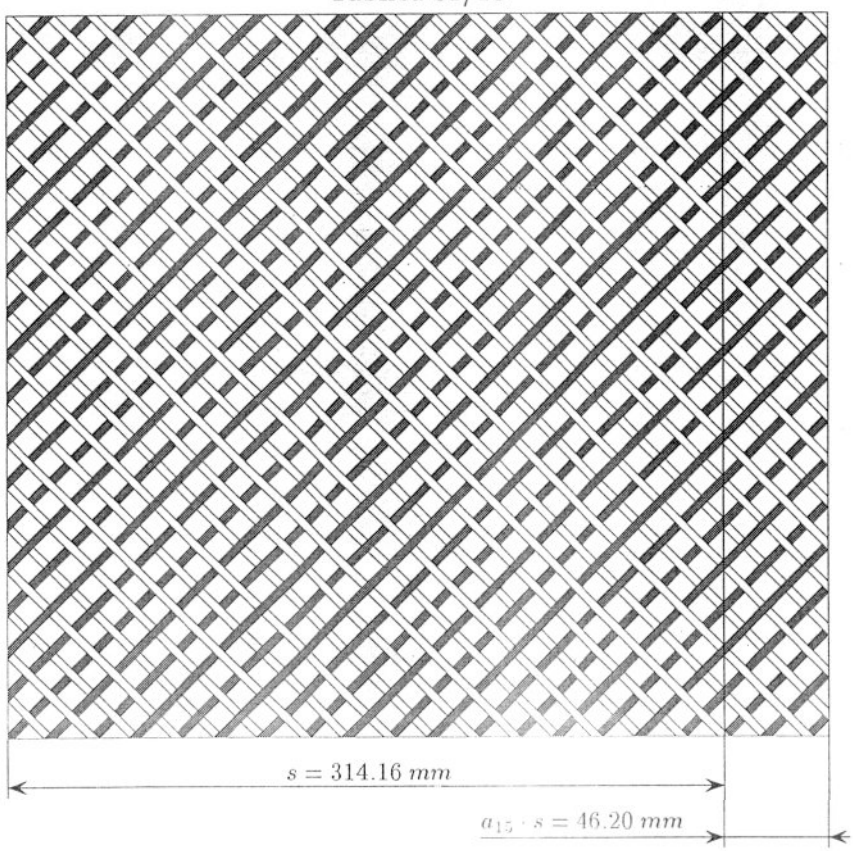
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/14



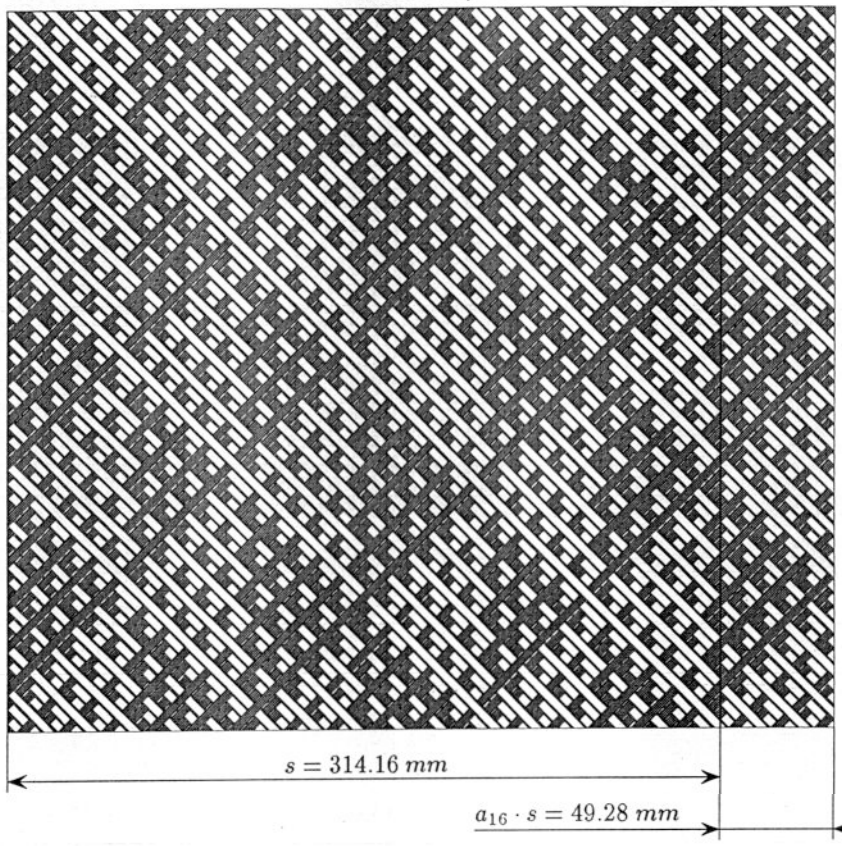
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/15



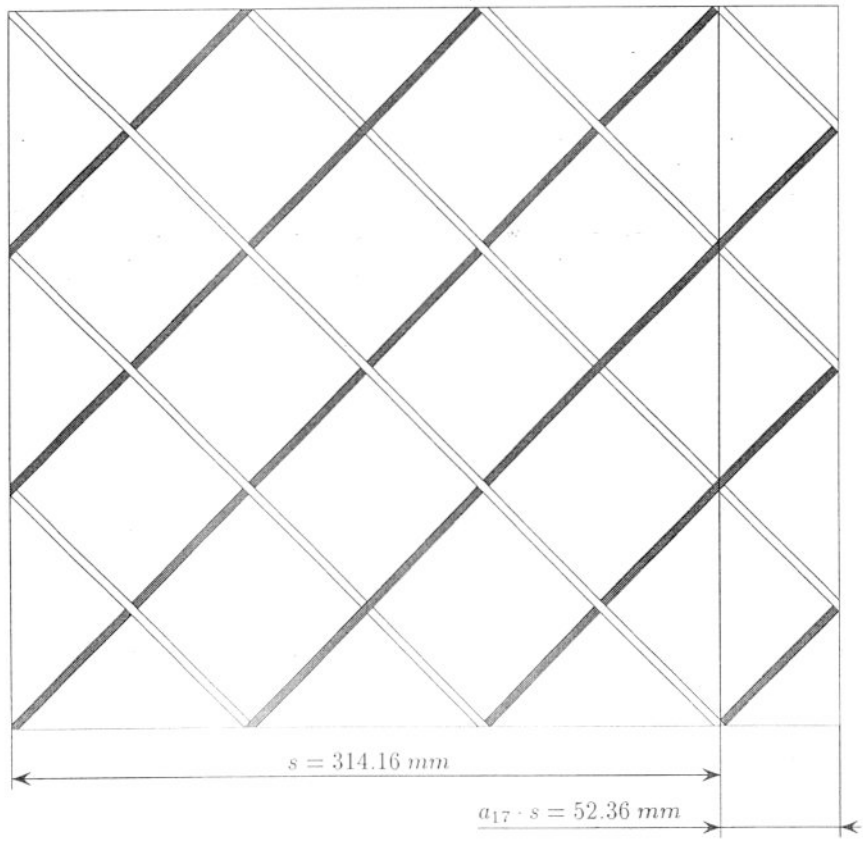
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/16



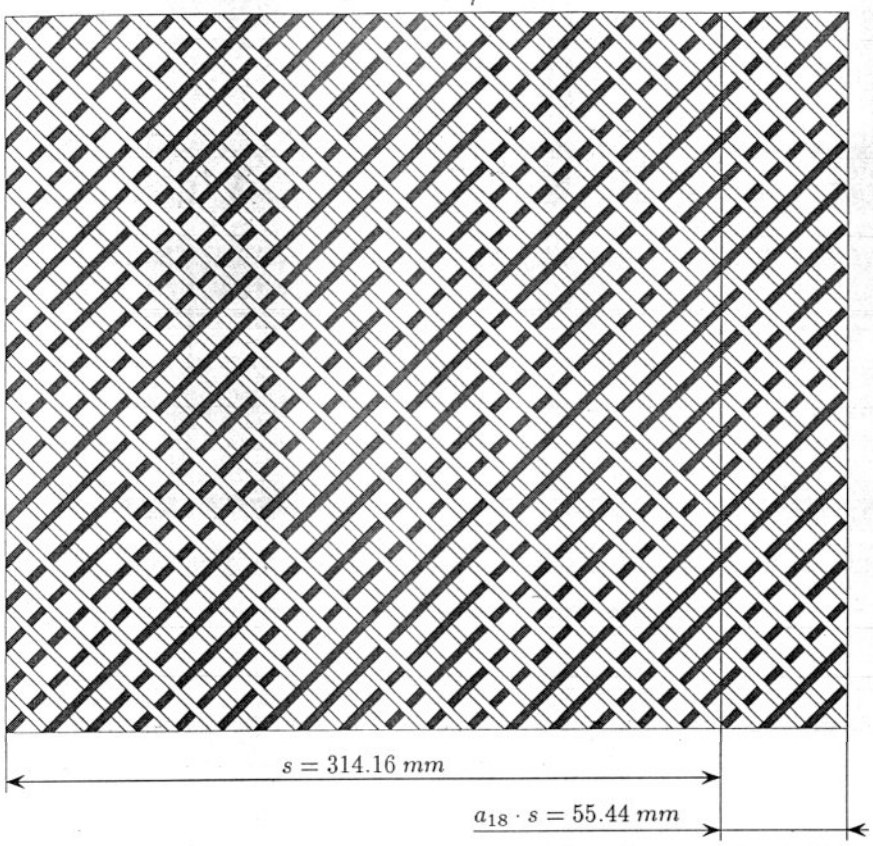
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/17



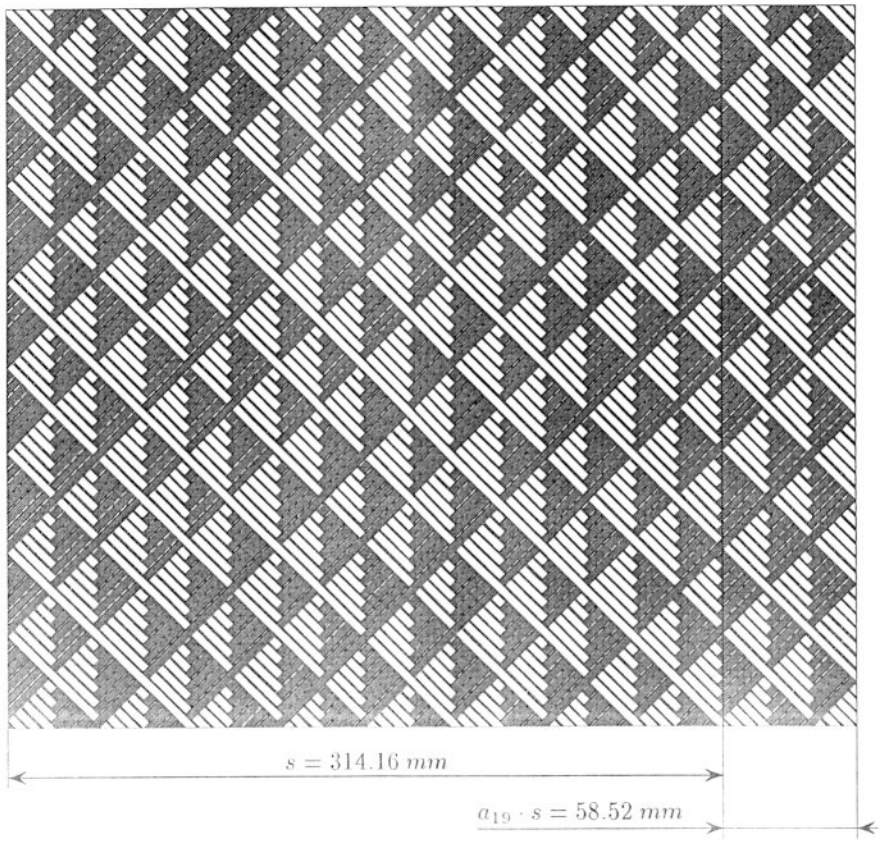
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/18



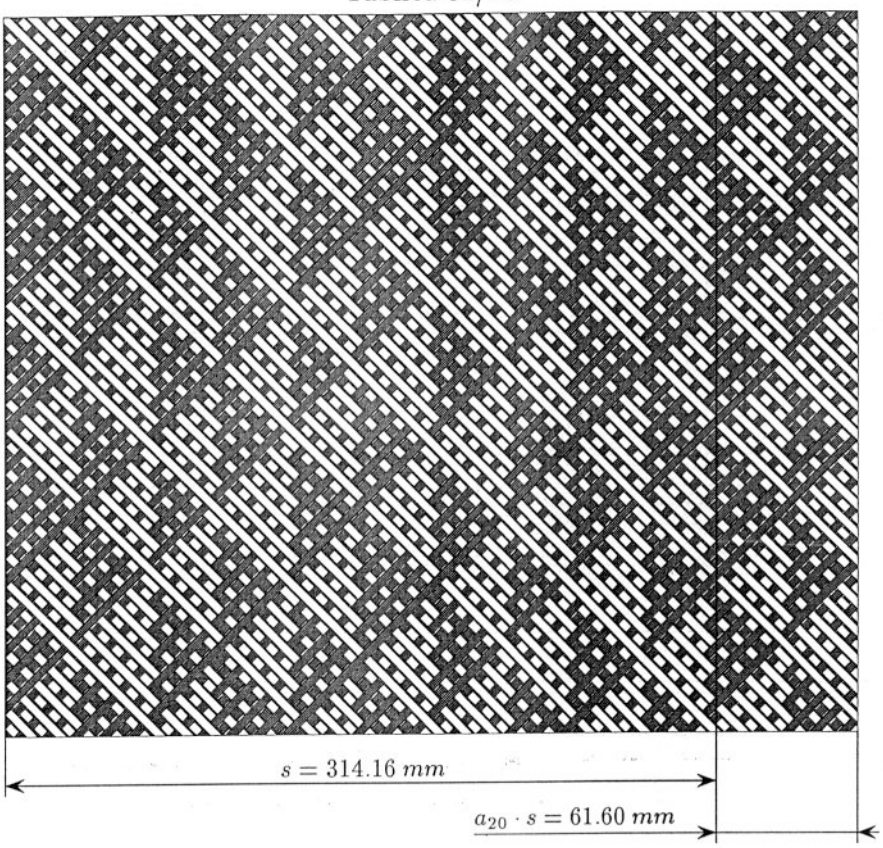
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/19



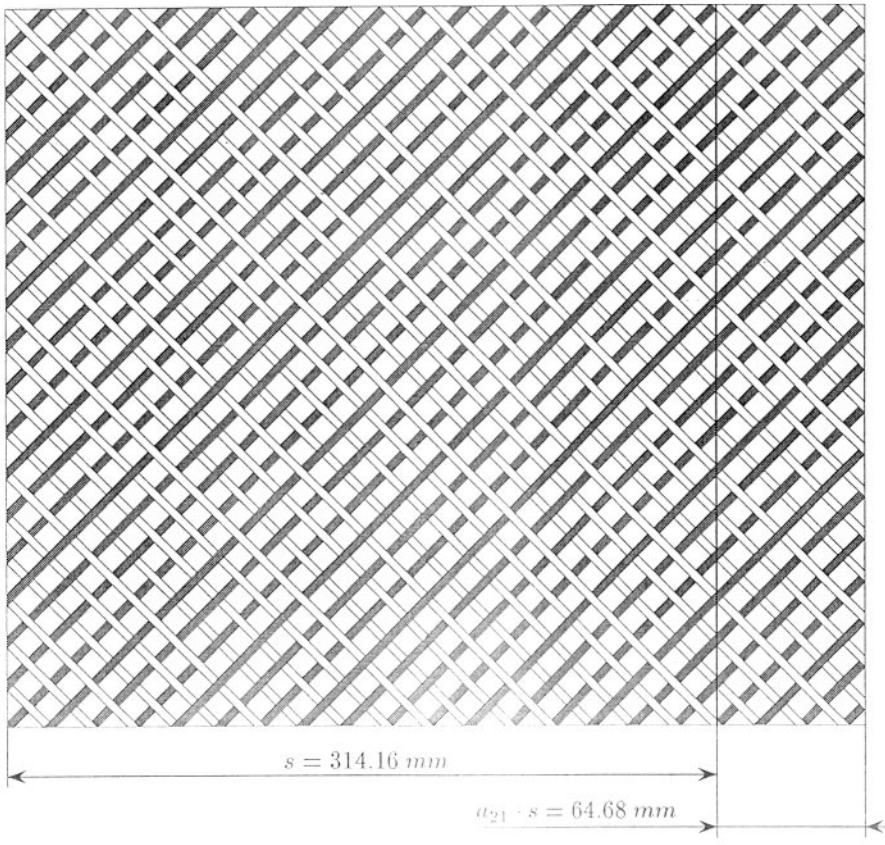
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 15.00°$

Tablica 51/20



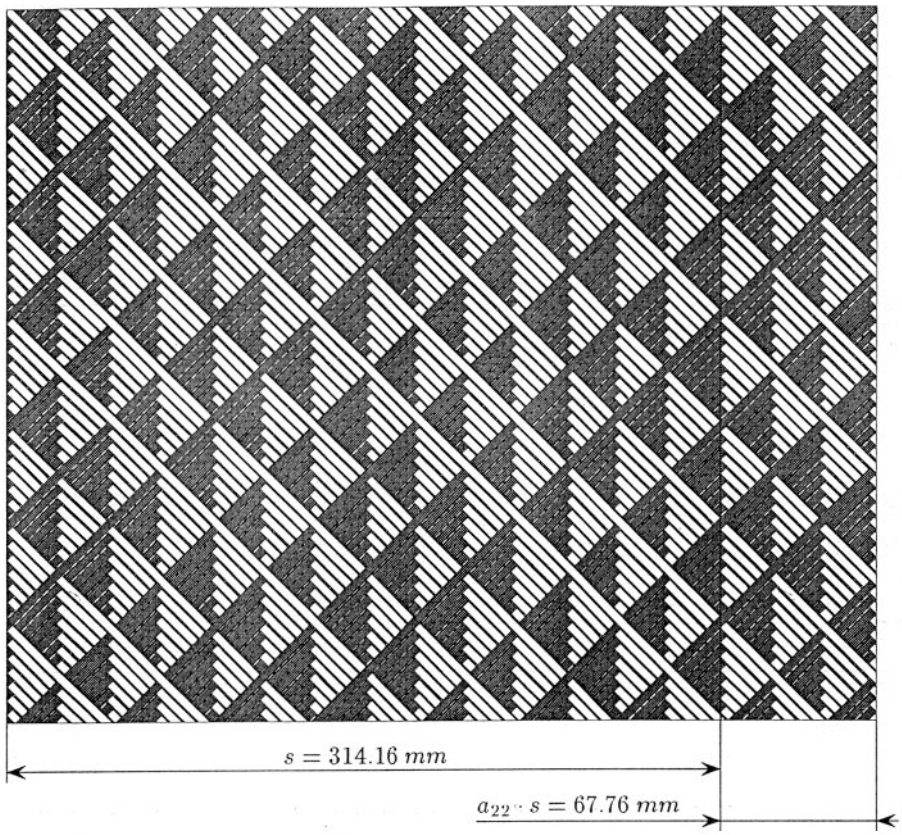
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/21



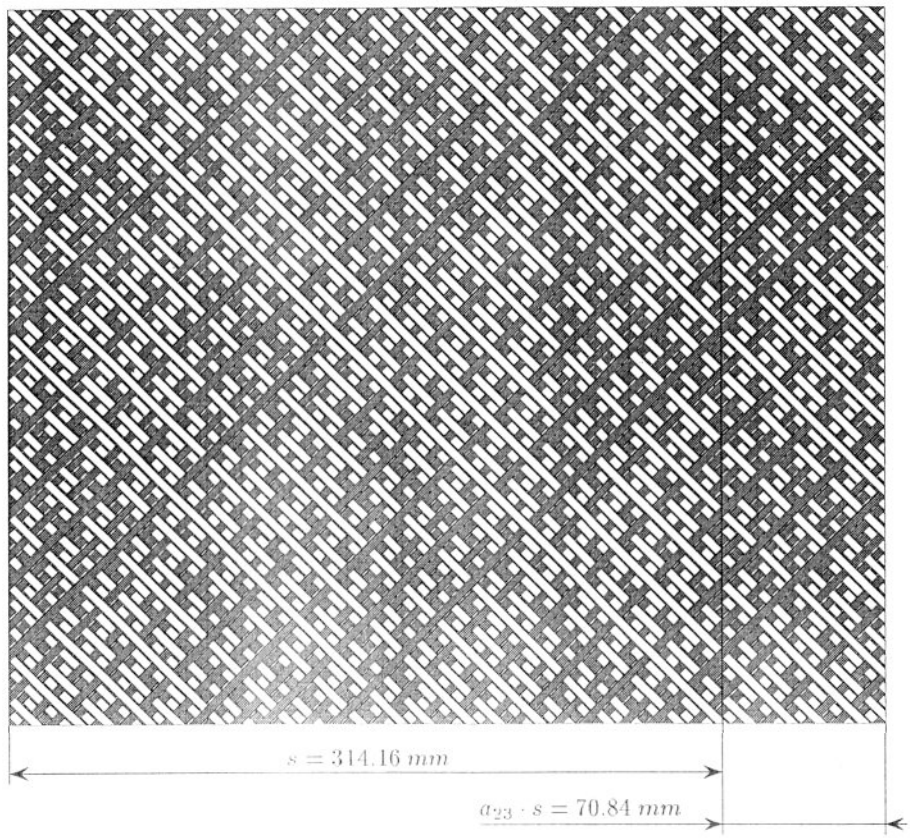
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/22



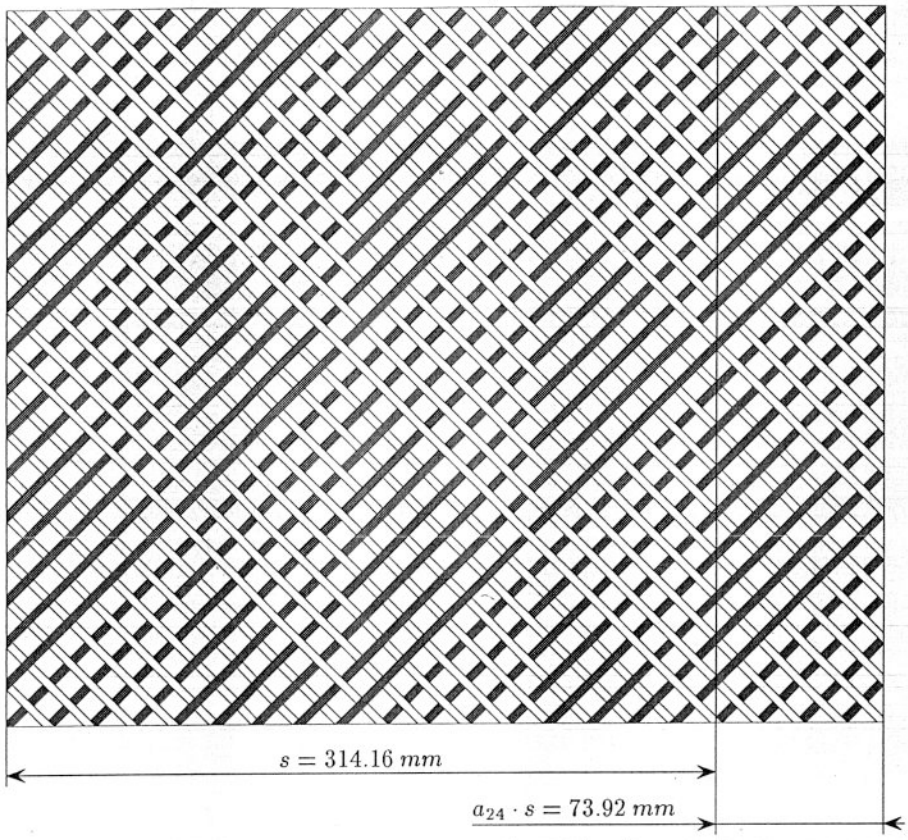
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/23



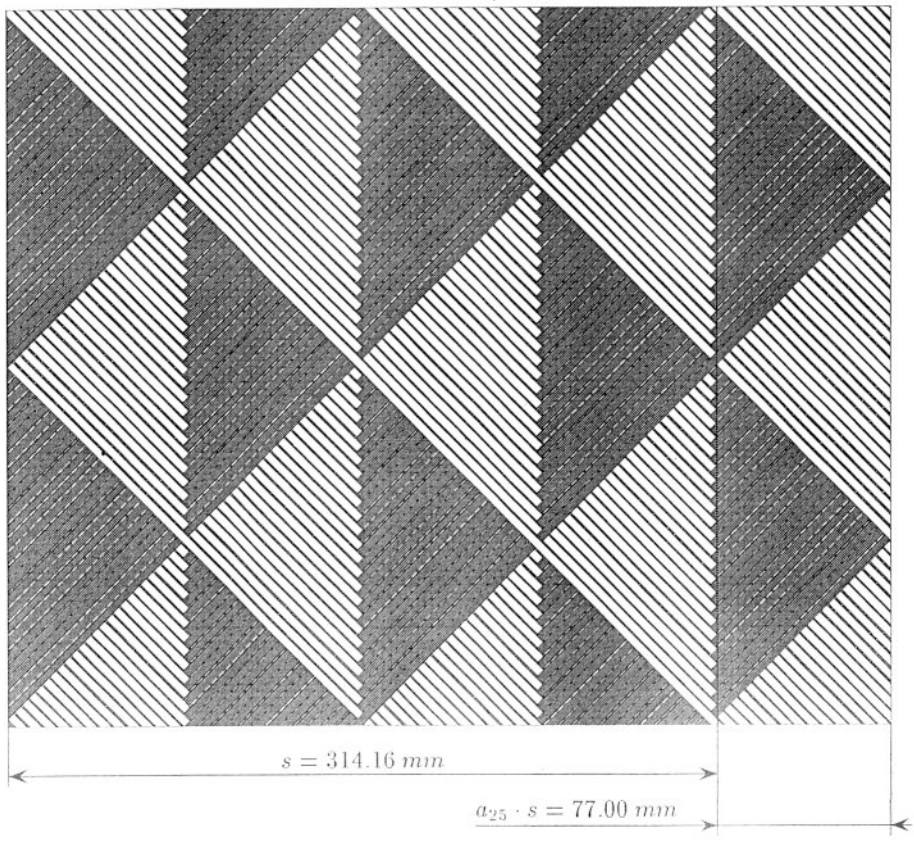
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 51/24



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

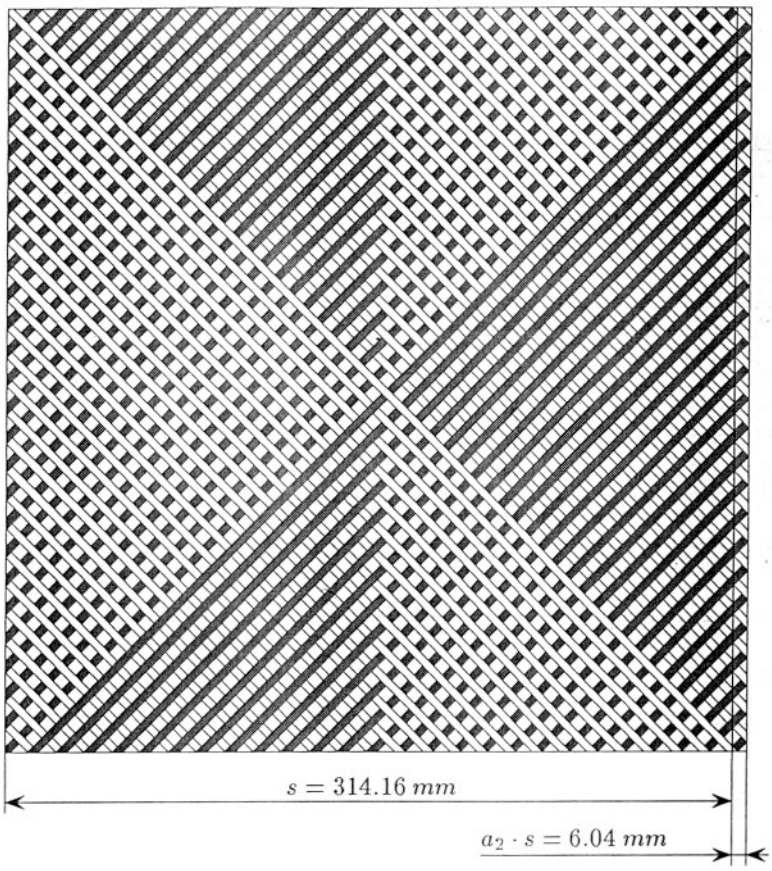
Tablica 51/25



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

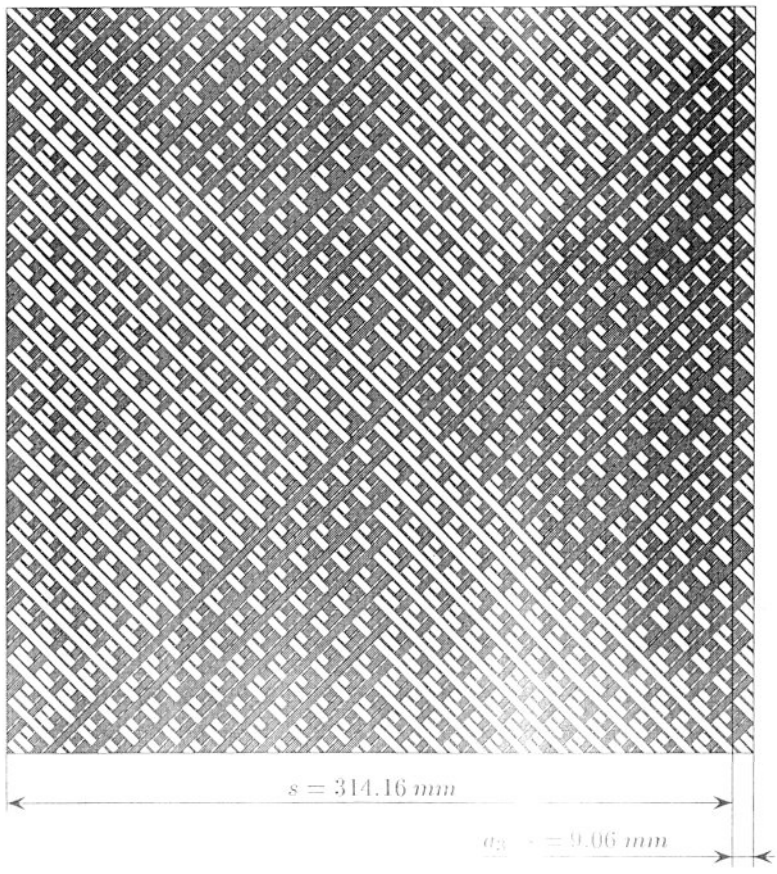
| Liczba wiązek rowingu: 52 | | |

Tablica 52/2



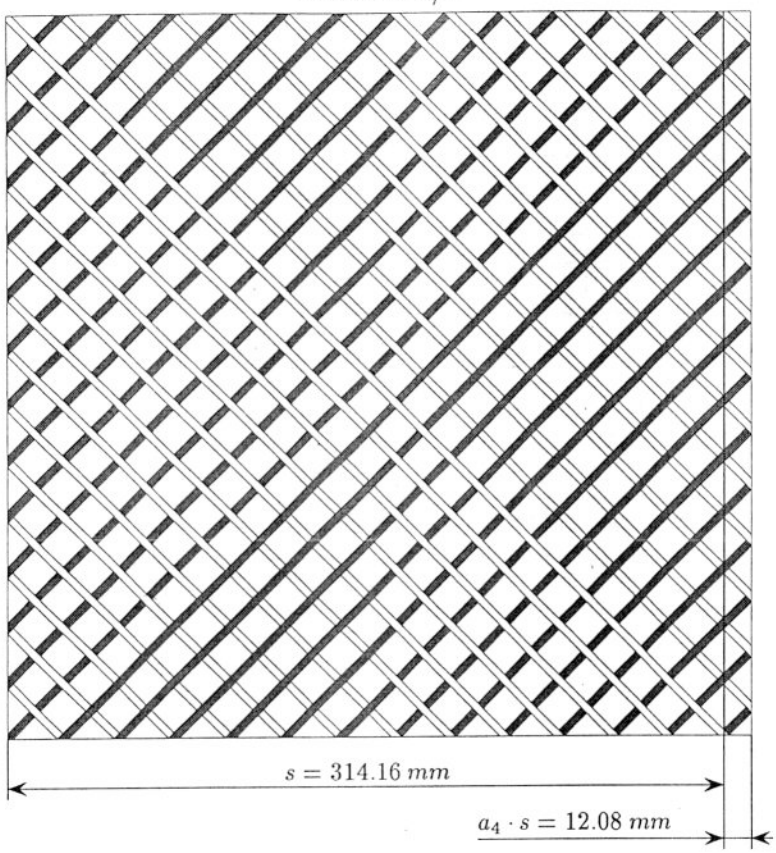
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/3



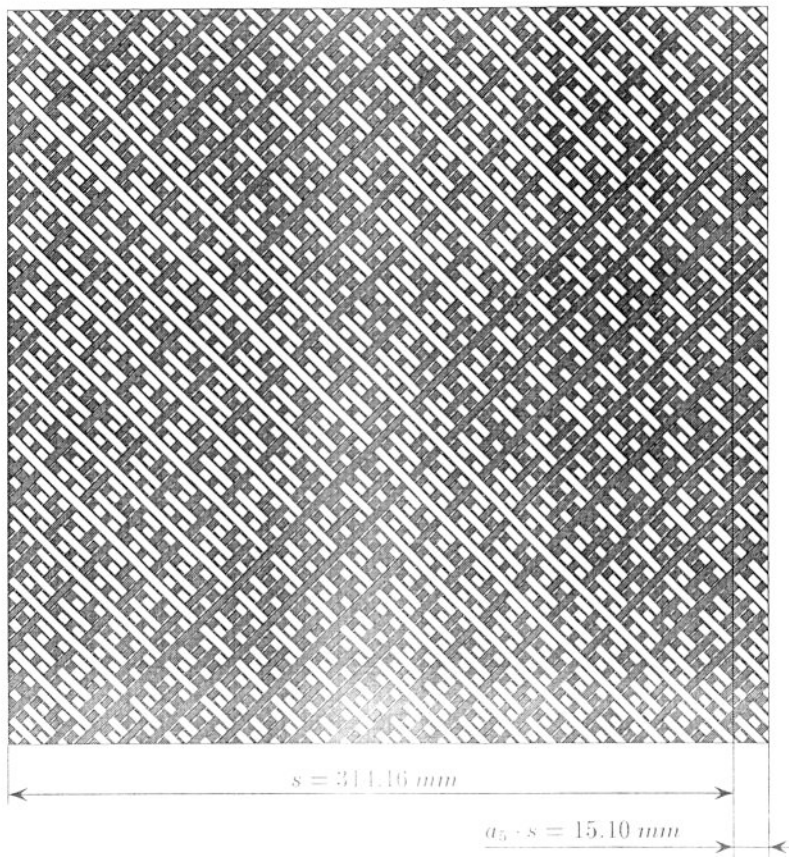
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/4



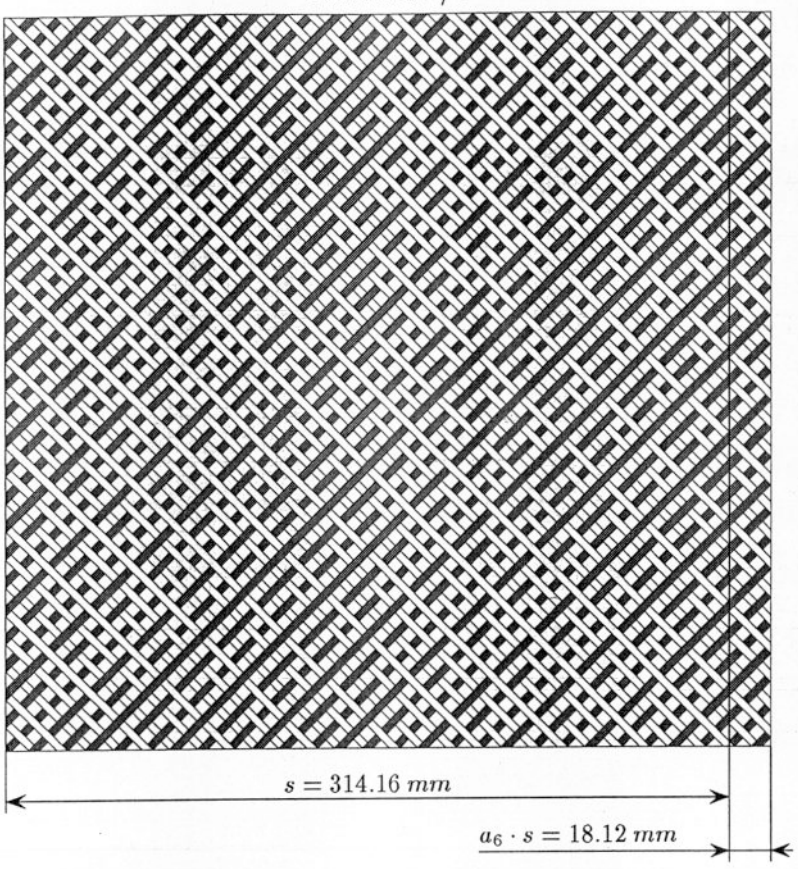
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/5



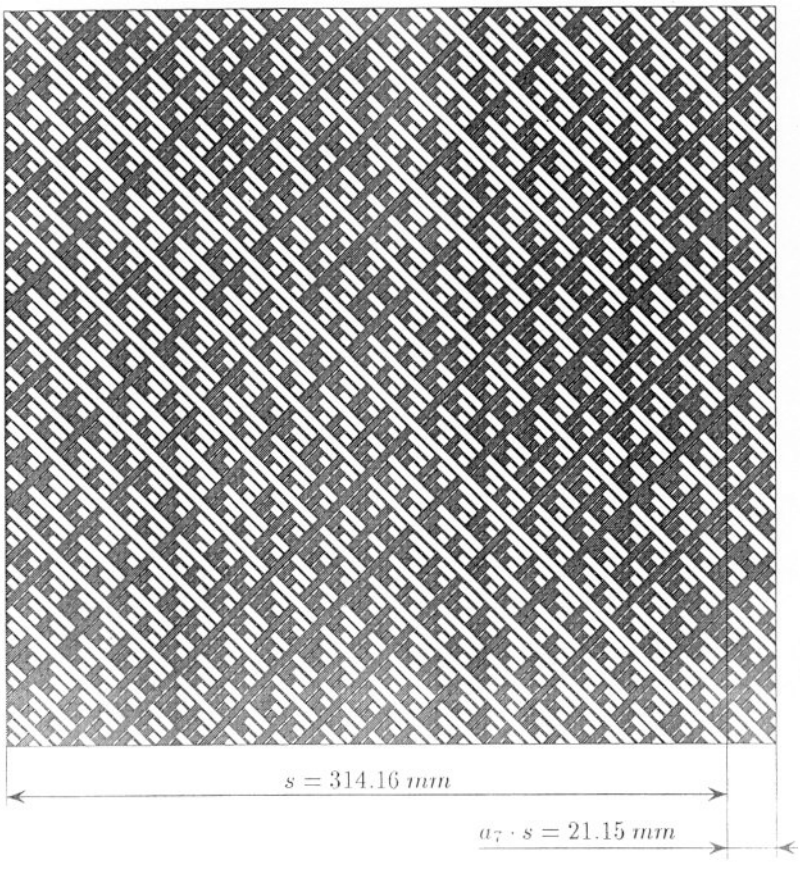
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/6



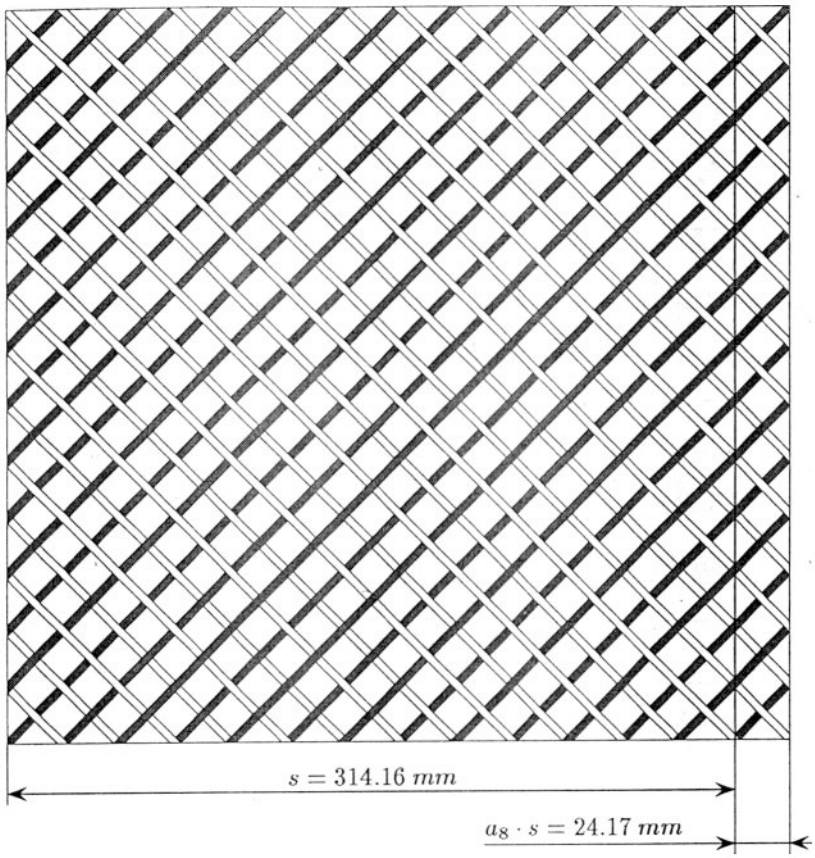
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/7



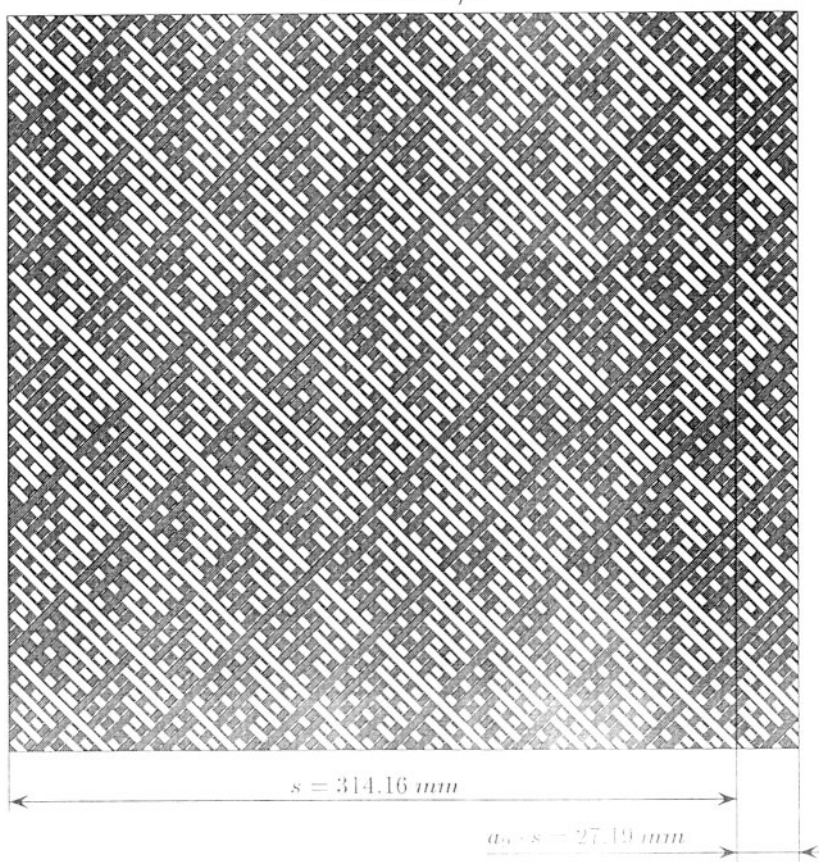
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/8



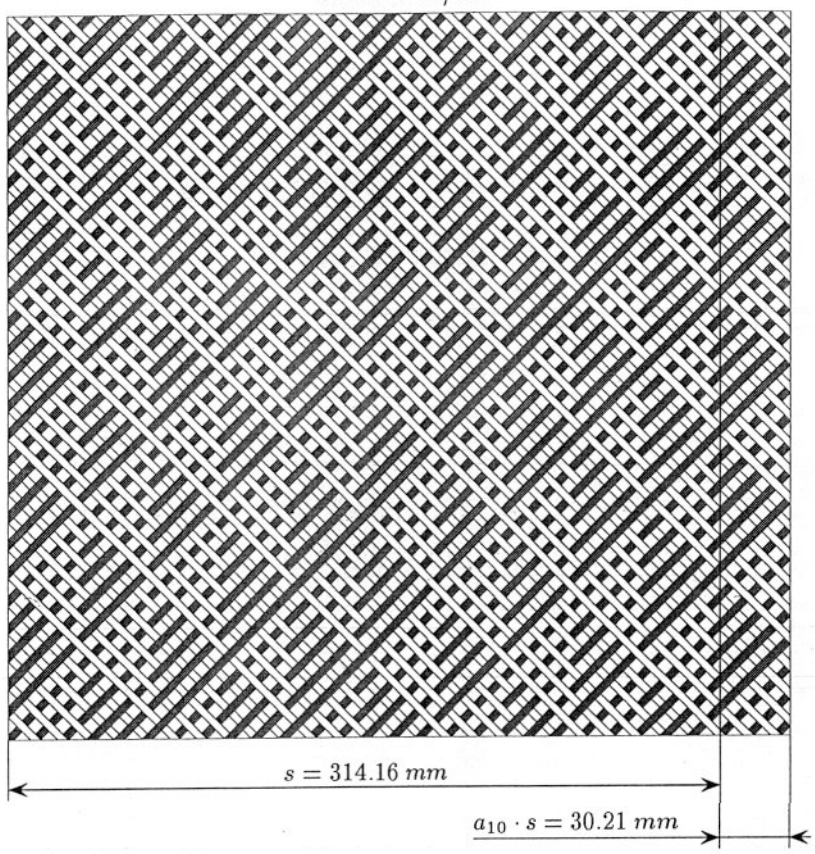
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/9



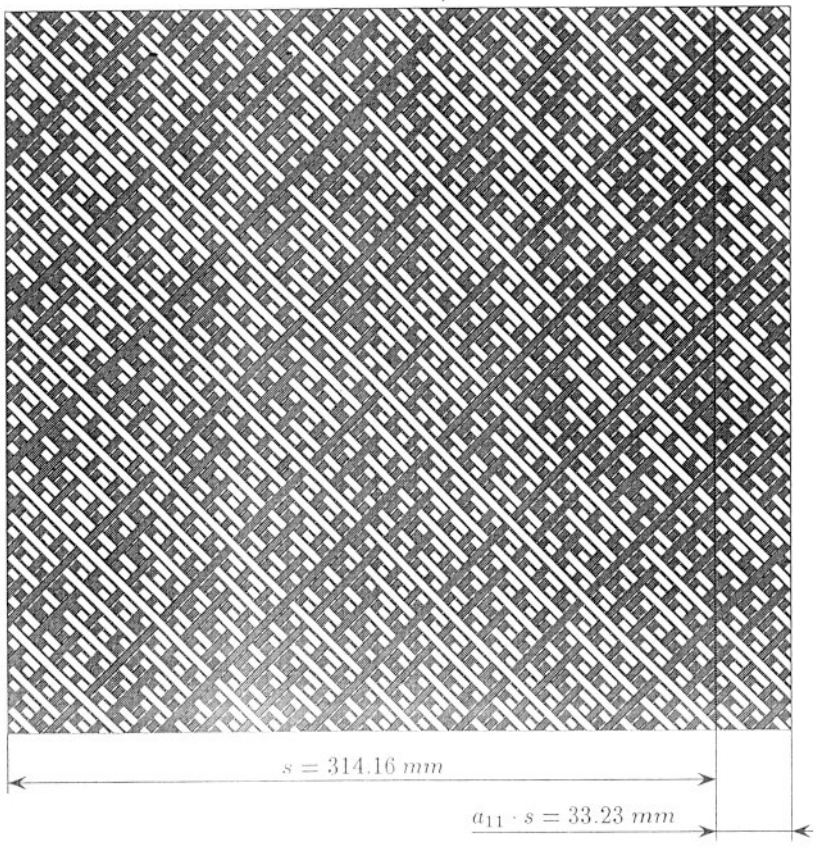
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/10



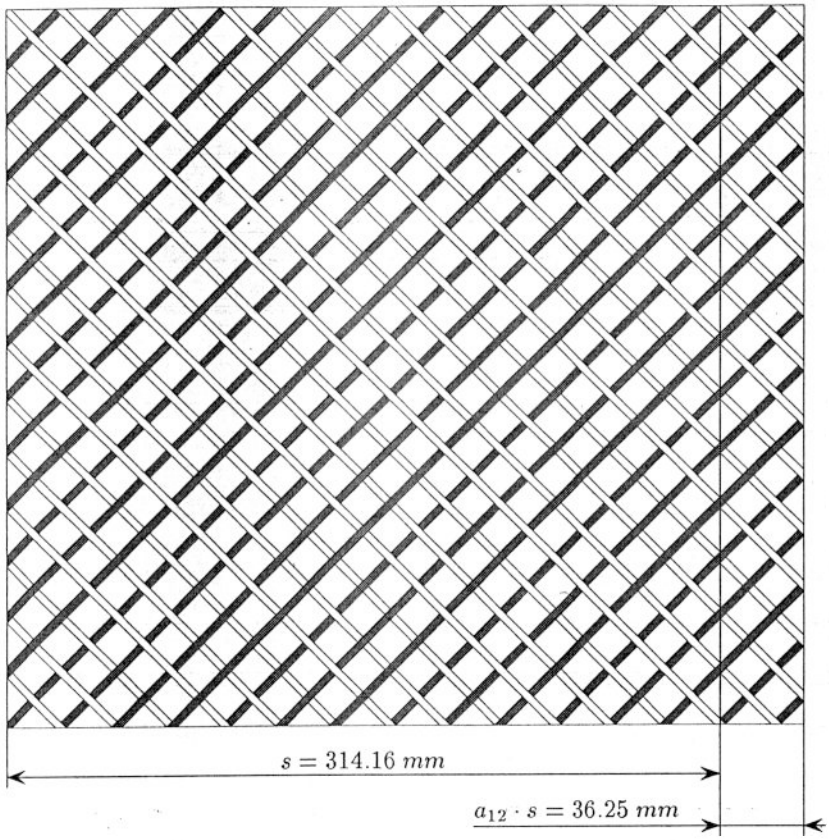
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/11



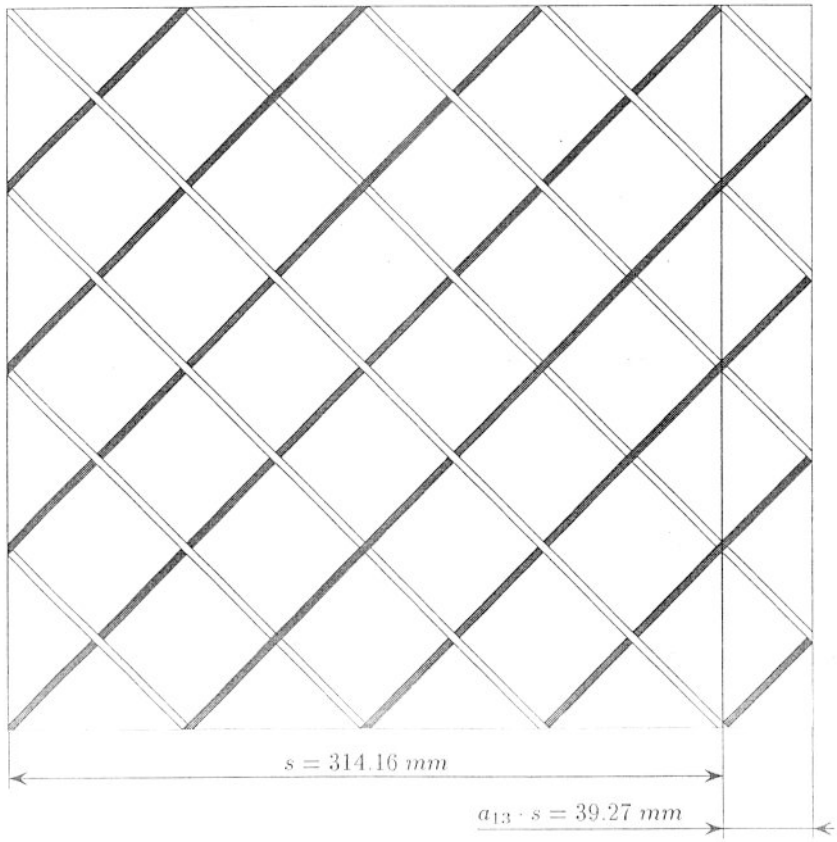
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/12



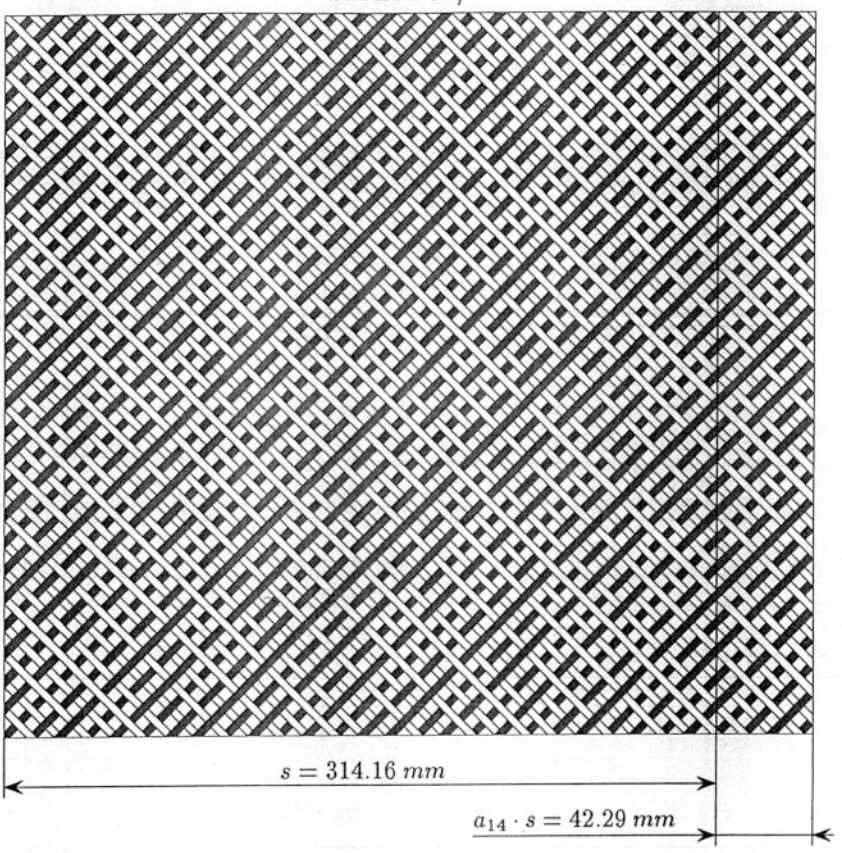
$d = 100.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/13



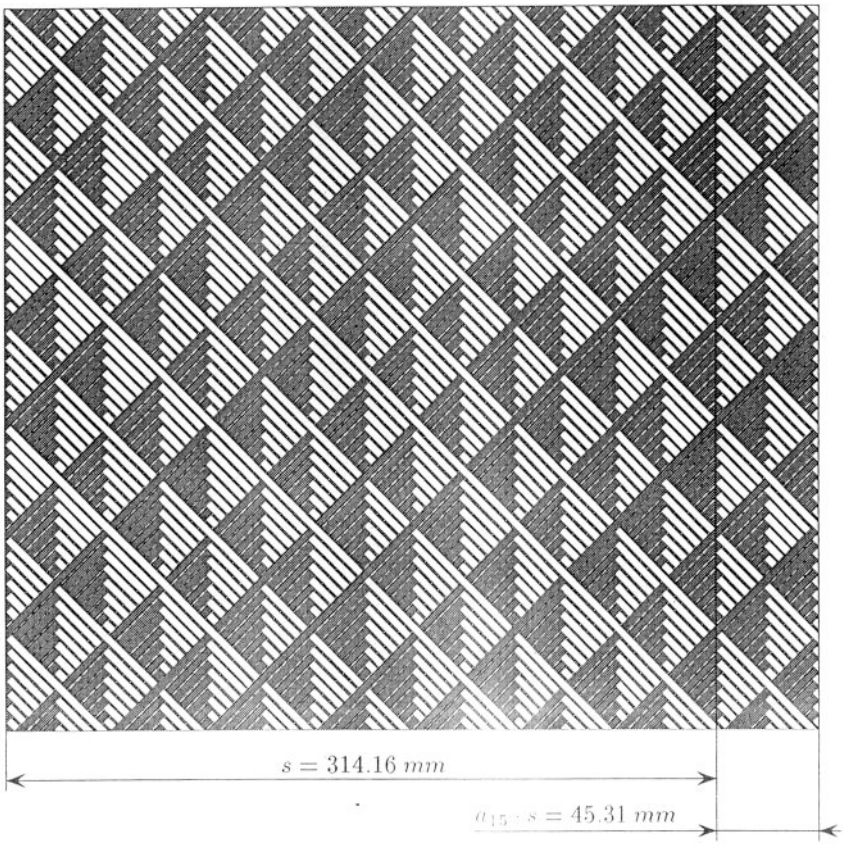
$d = 100.00\,mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/14



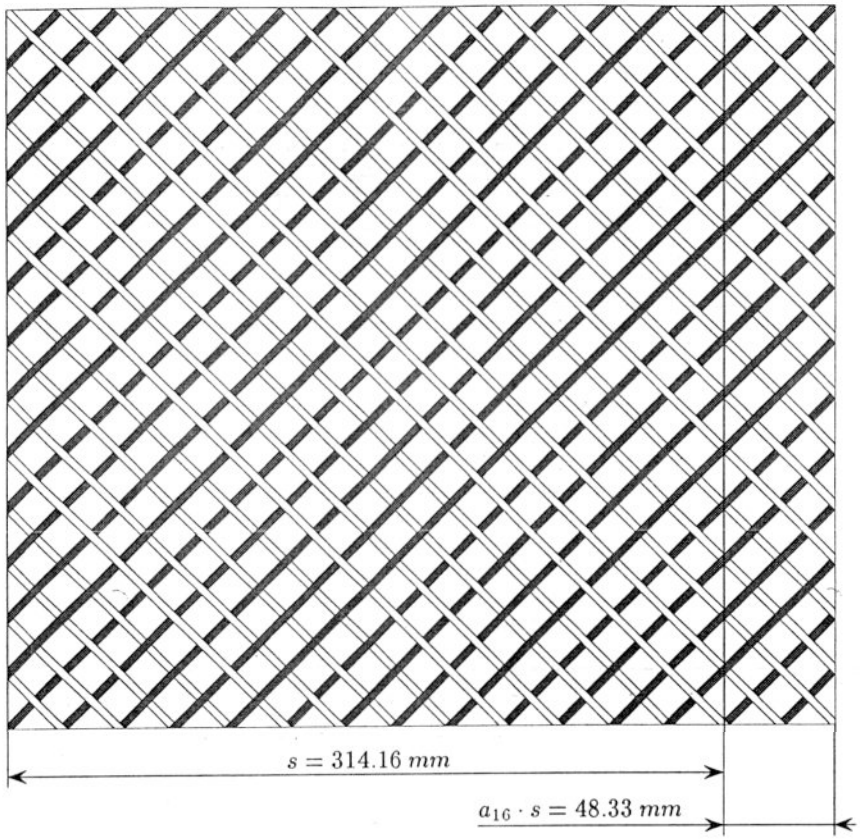
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/15



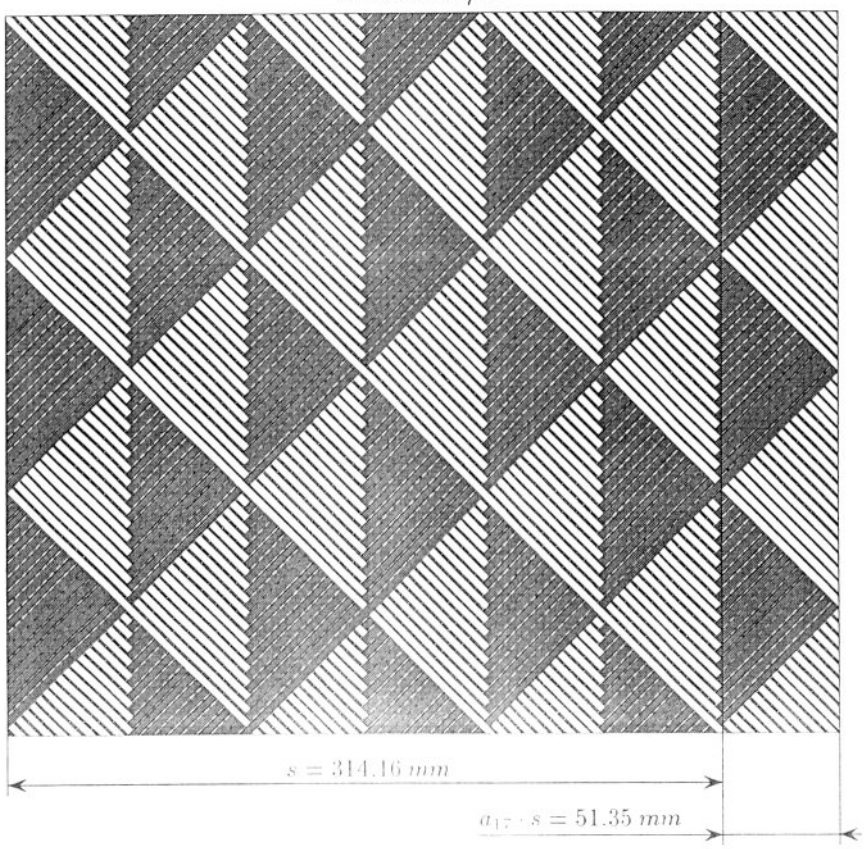
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/16



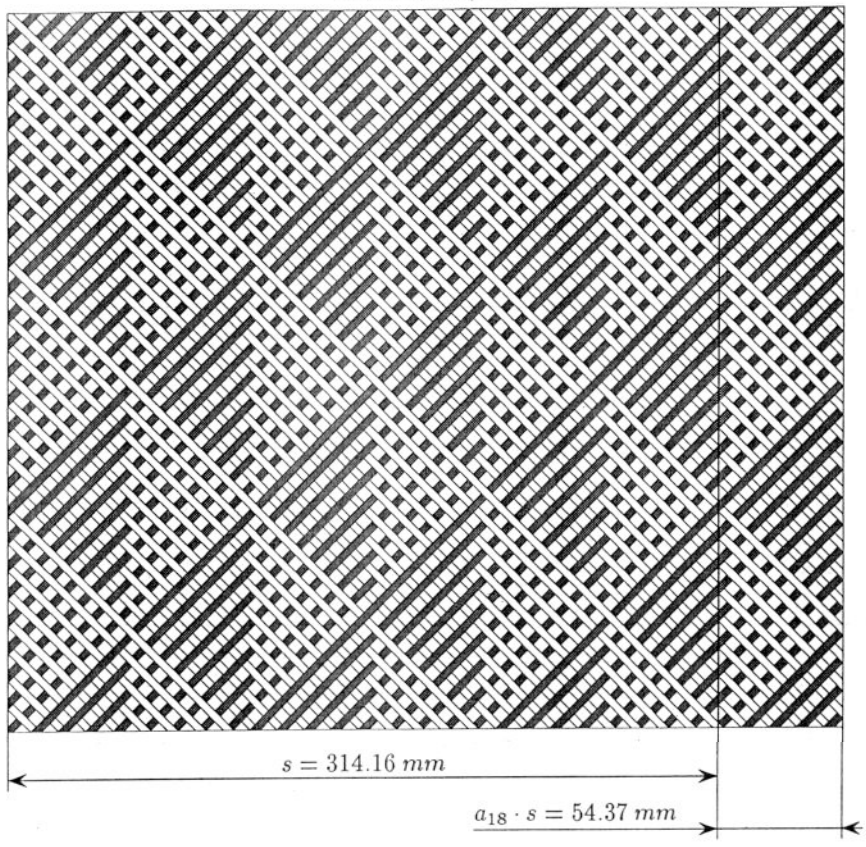
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/17



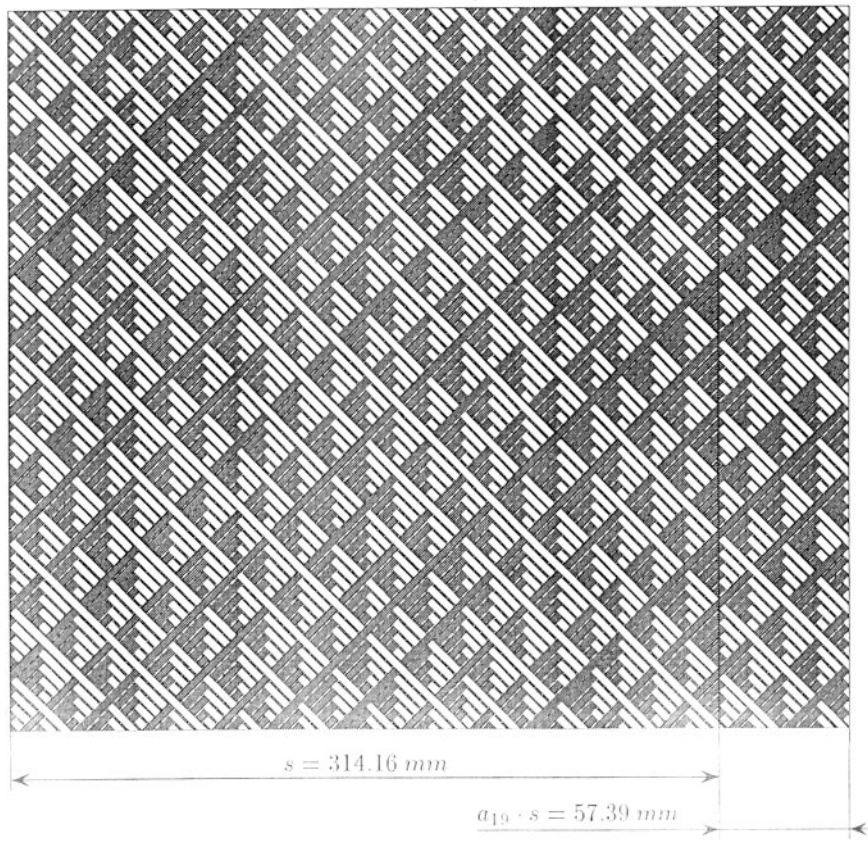
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/18



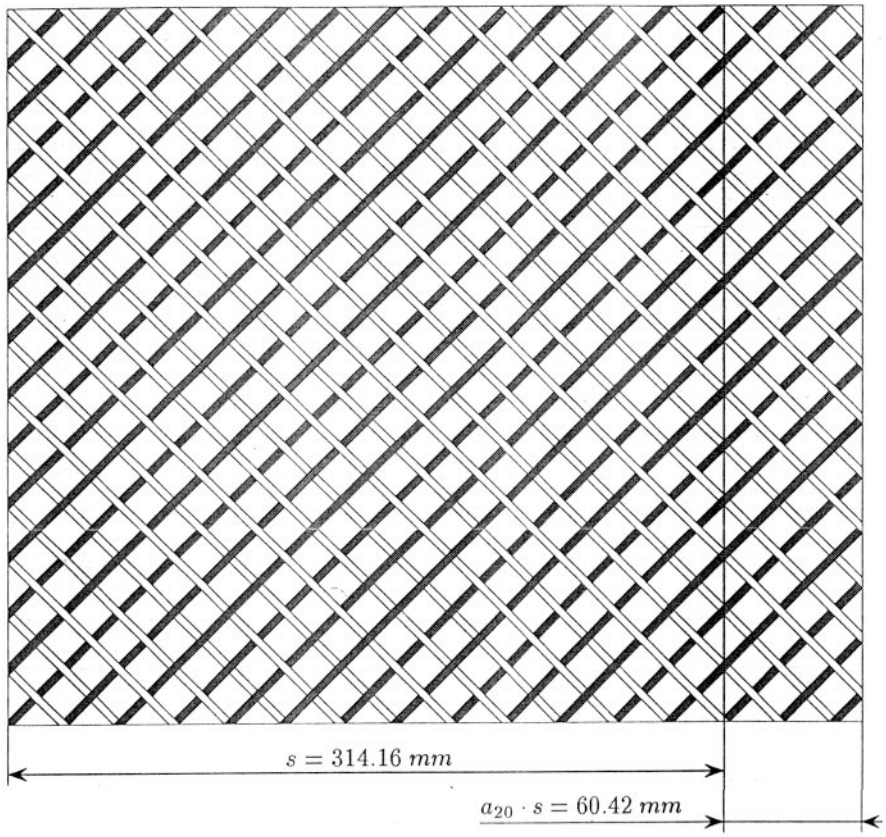
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/19



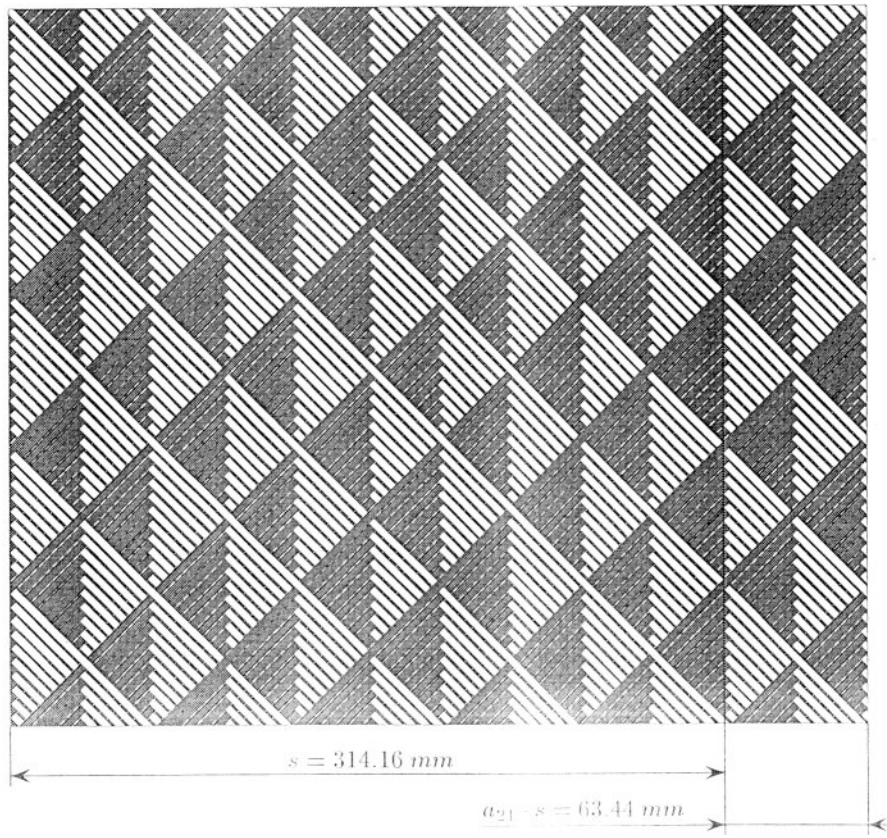
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/20



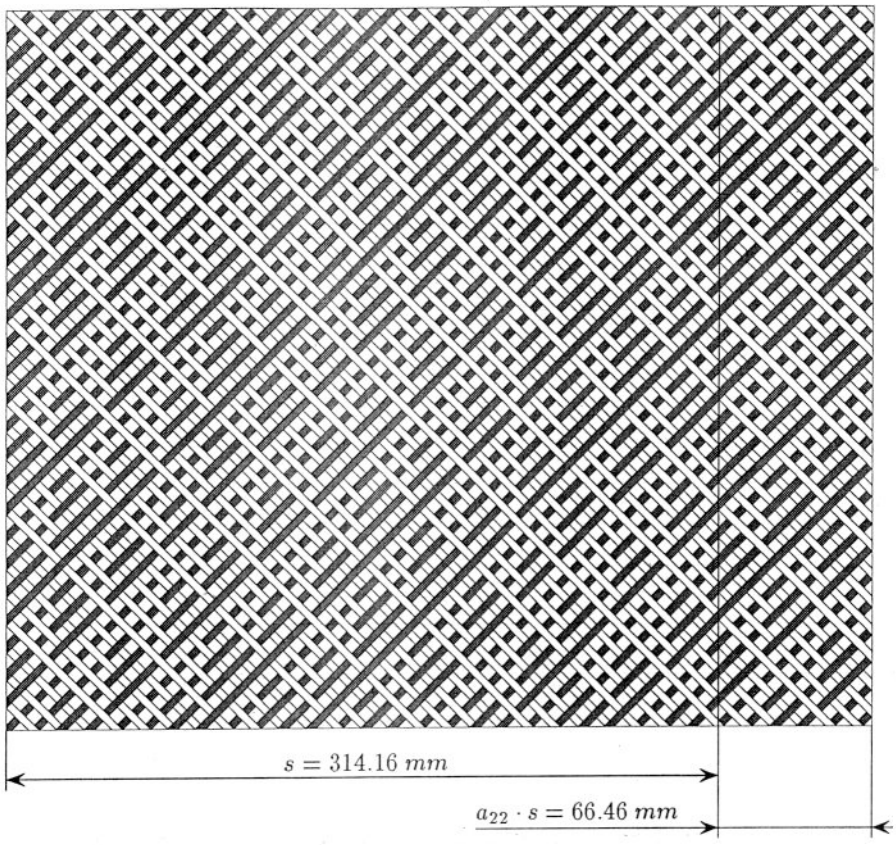
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/21



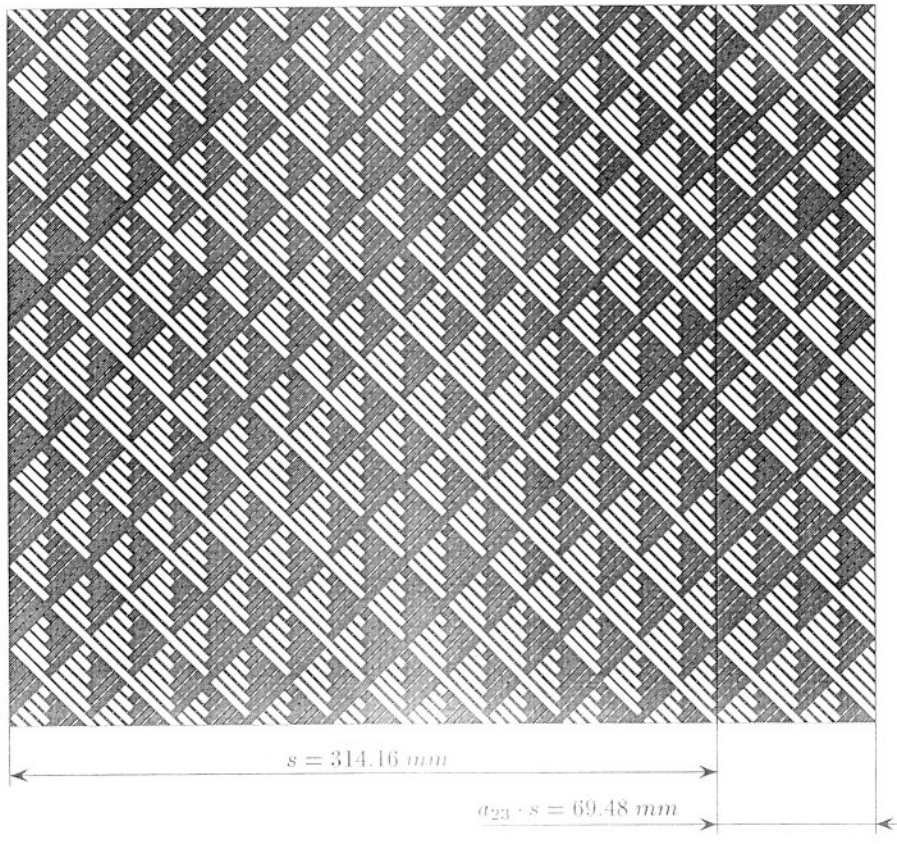
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/22



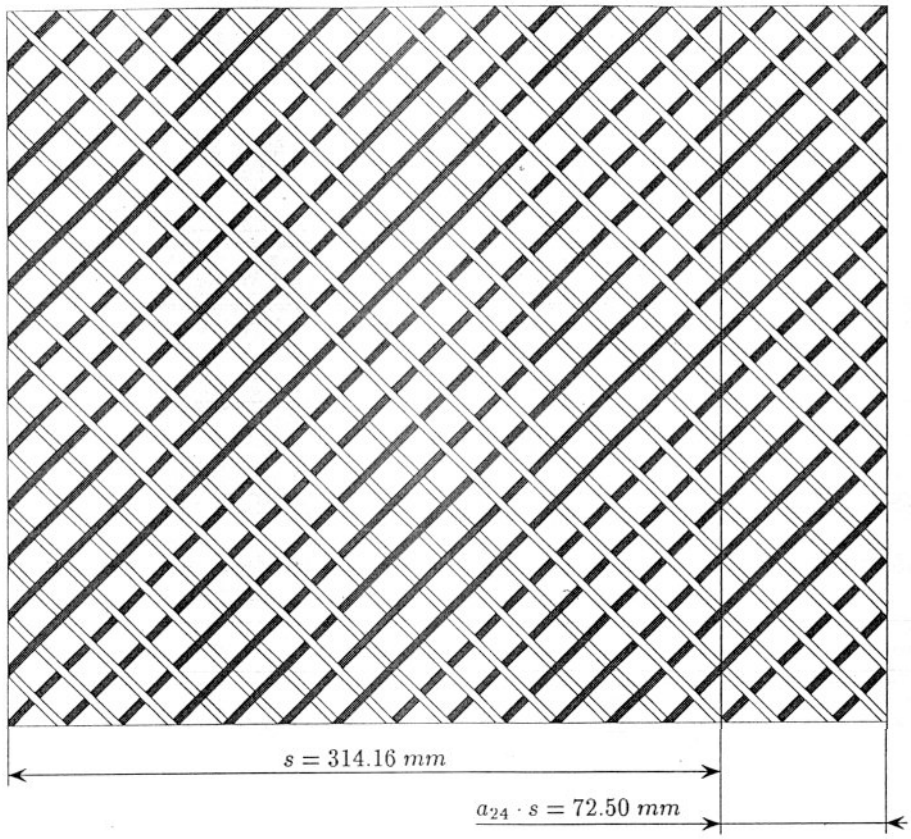
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/23



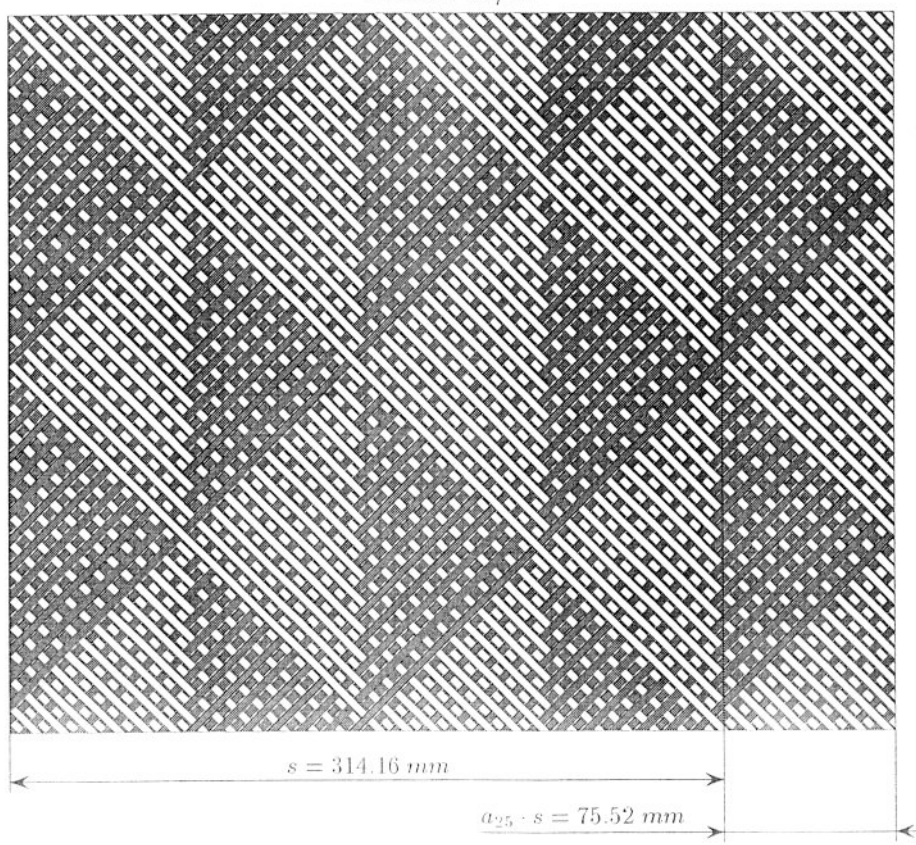
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/24



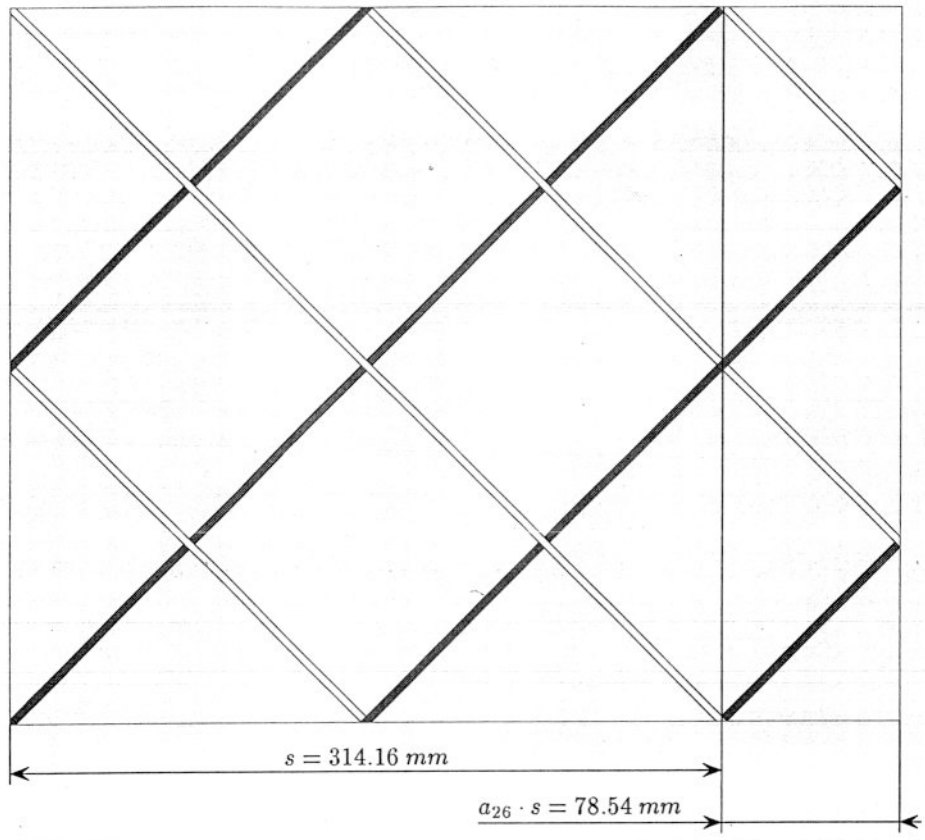
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 52/25



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

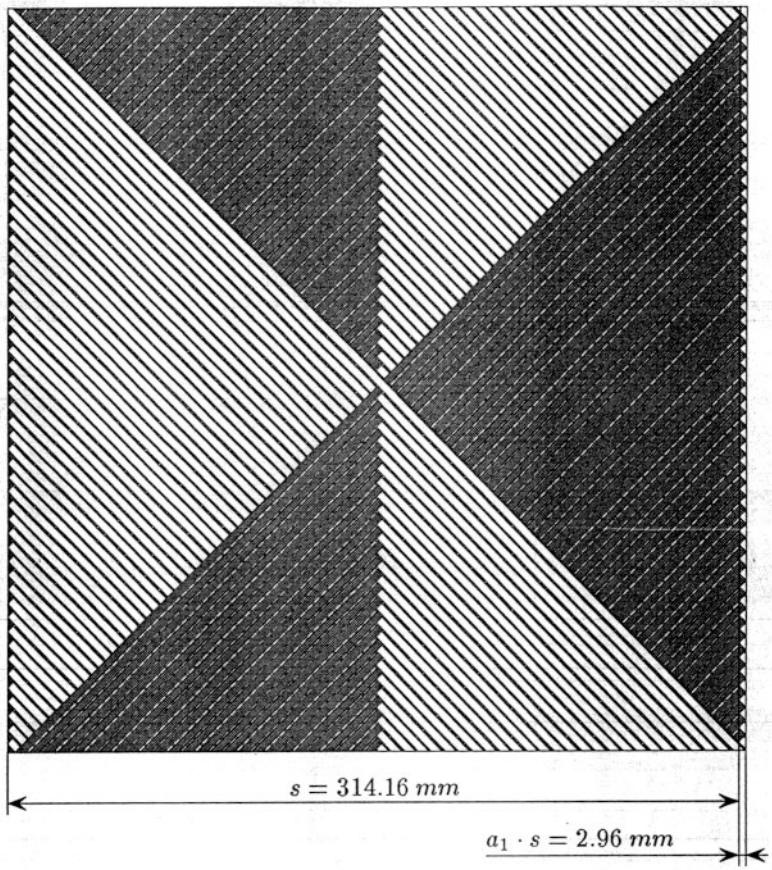
Tablica 52/26



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

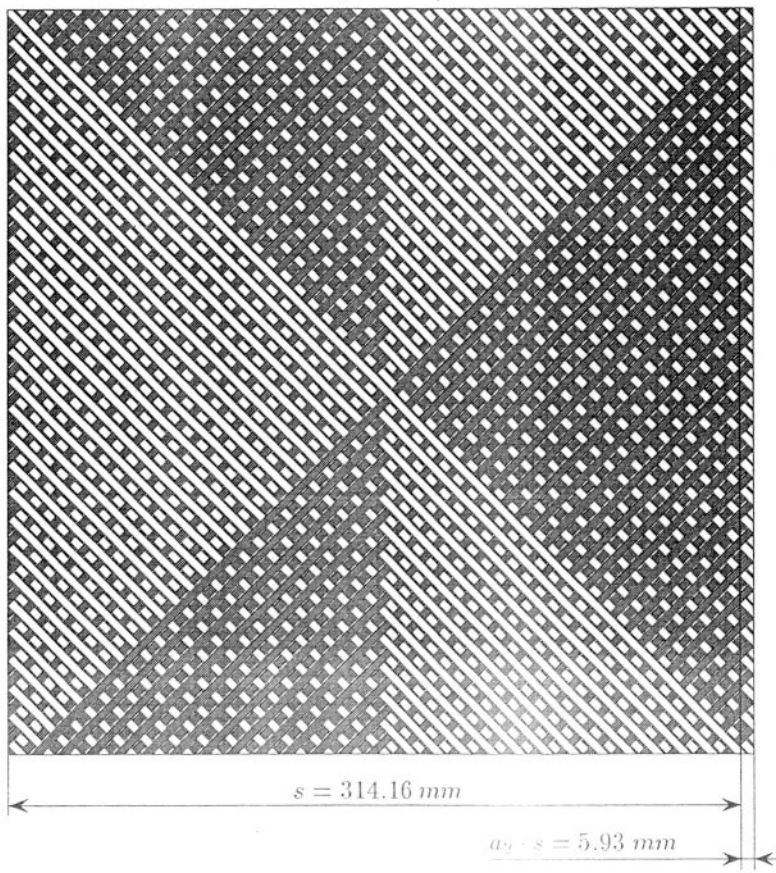
| Liczba wiązek rowingu: 53 | | |

Tablica 53/1



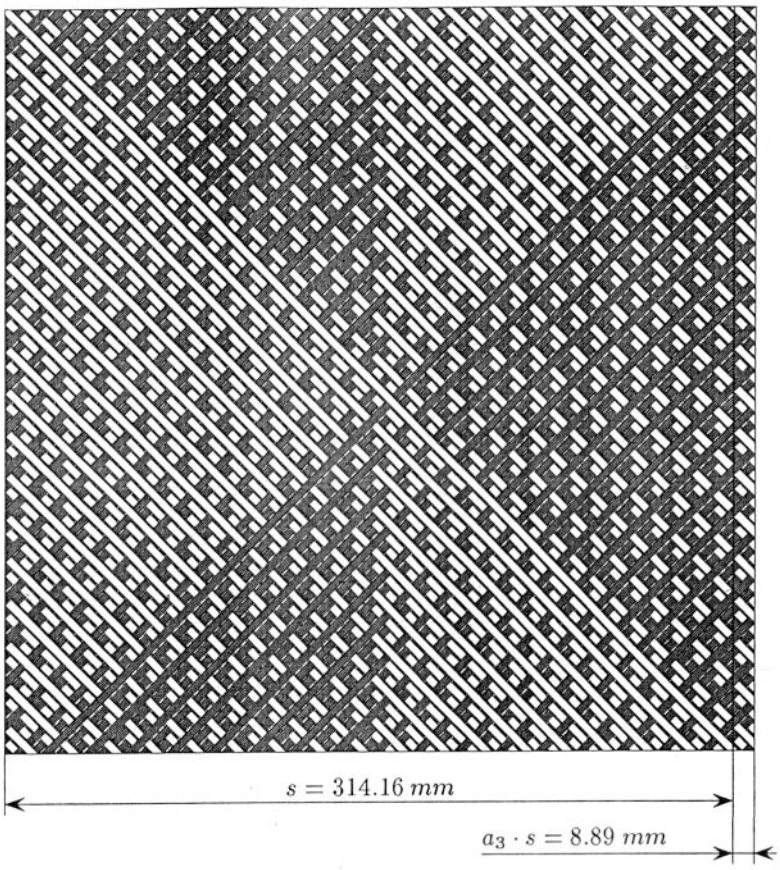
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/2



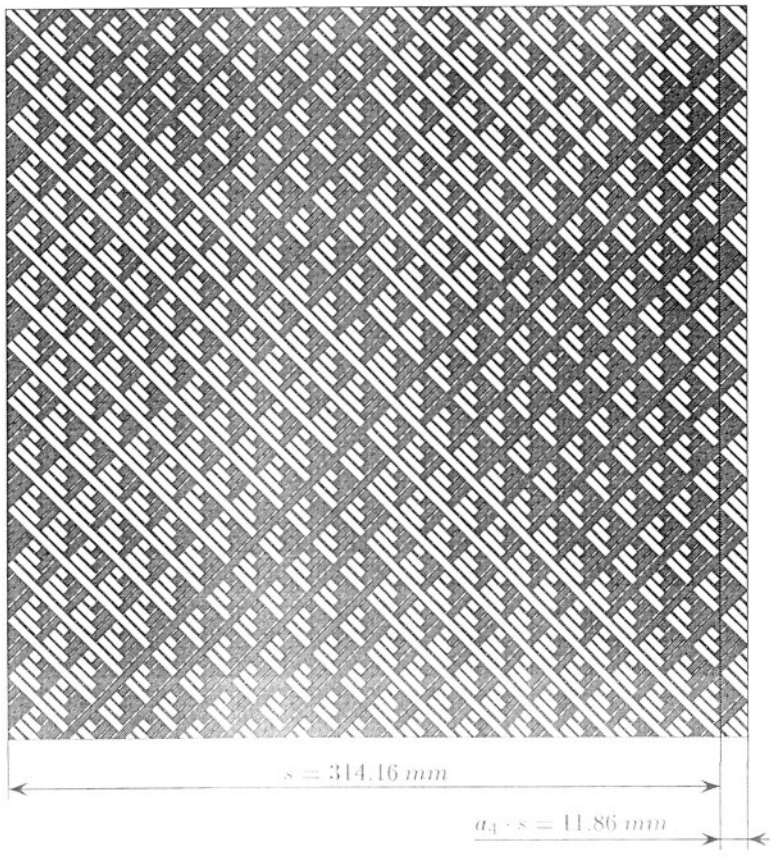
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/3



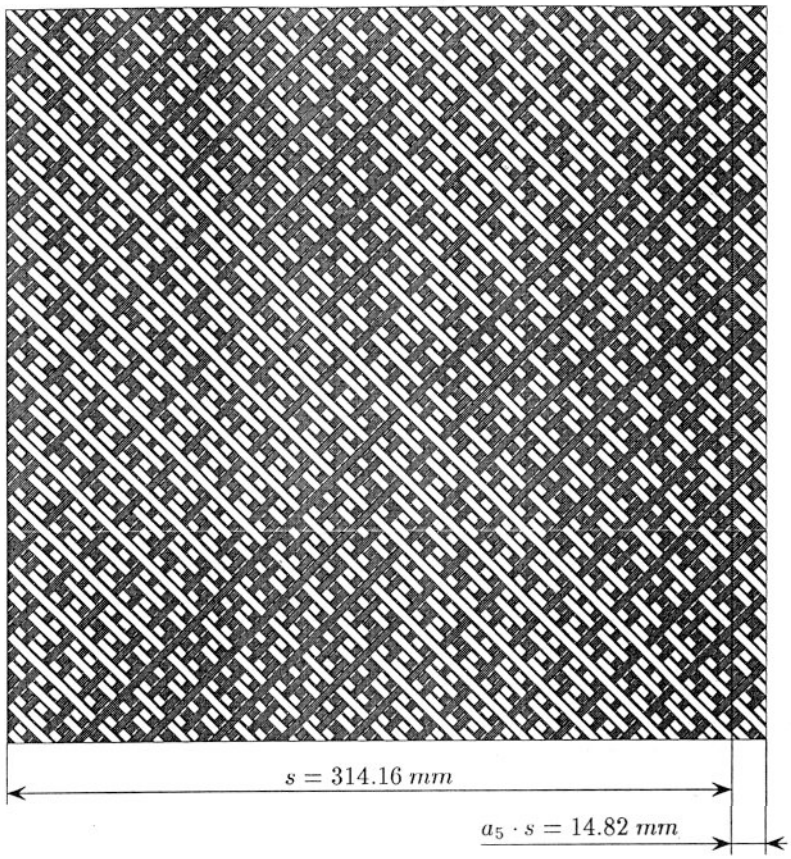
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/4



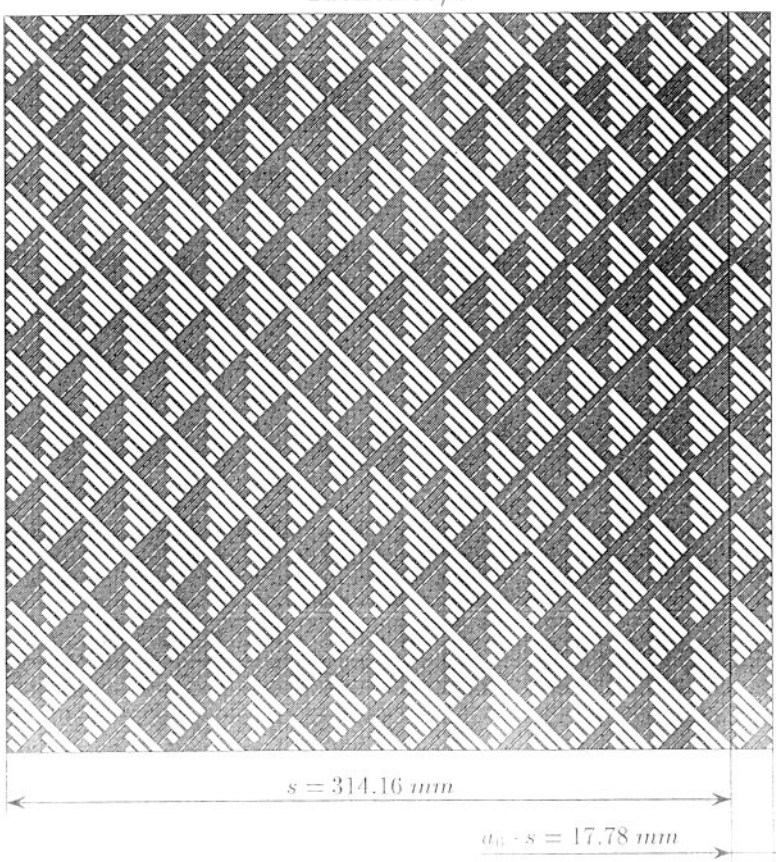
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/5



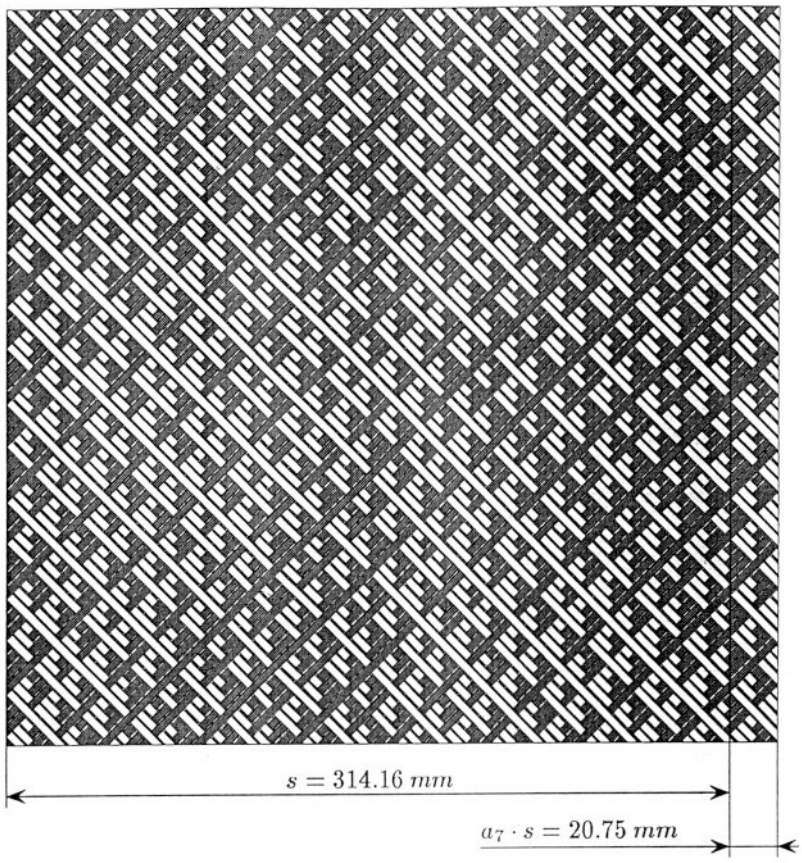
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/6



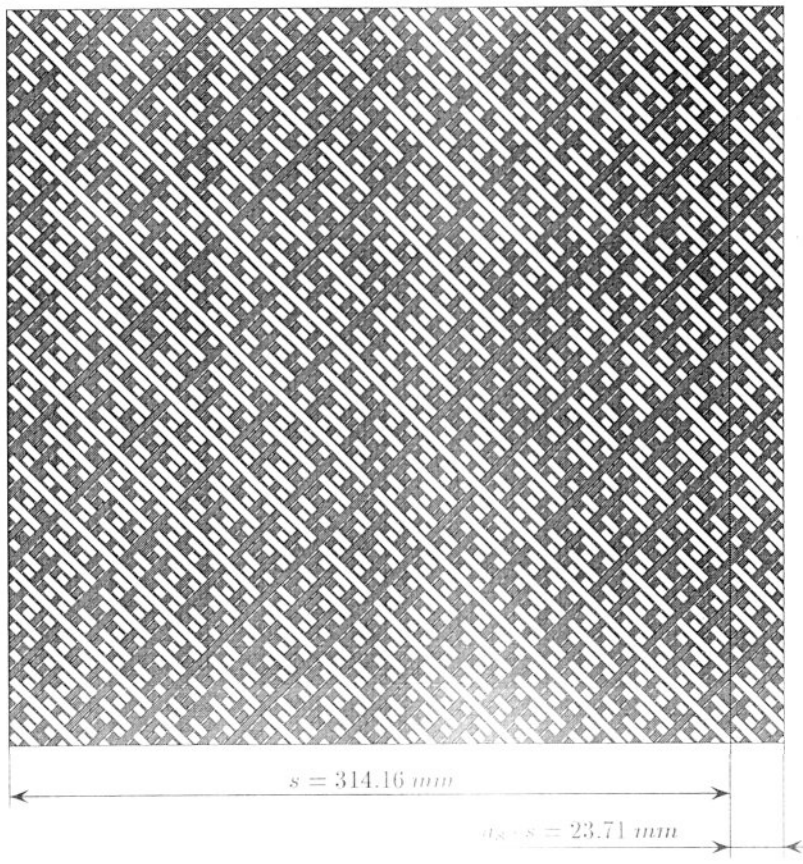
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 15.00°$

Tablica 53/7



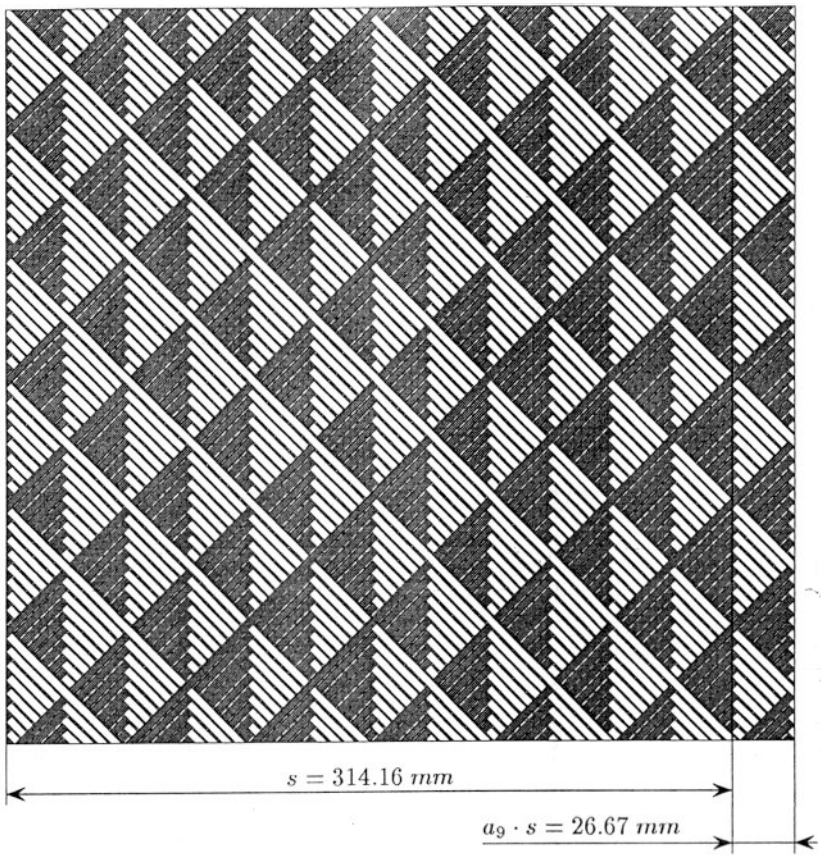
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/8



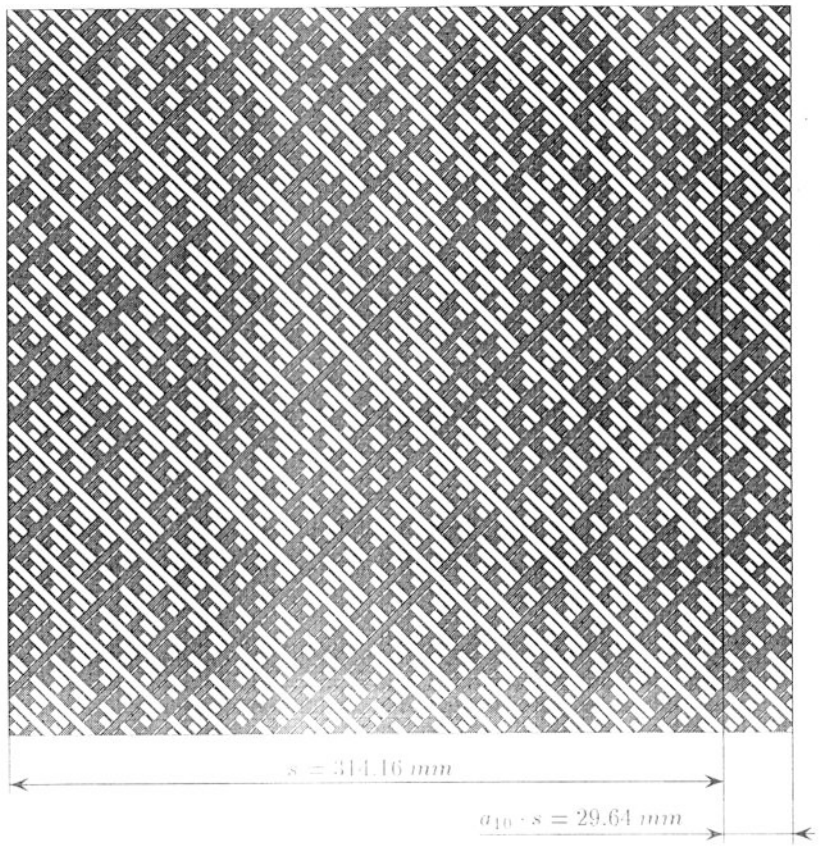
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/9



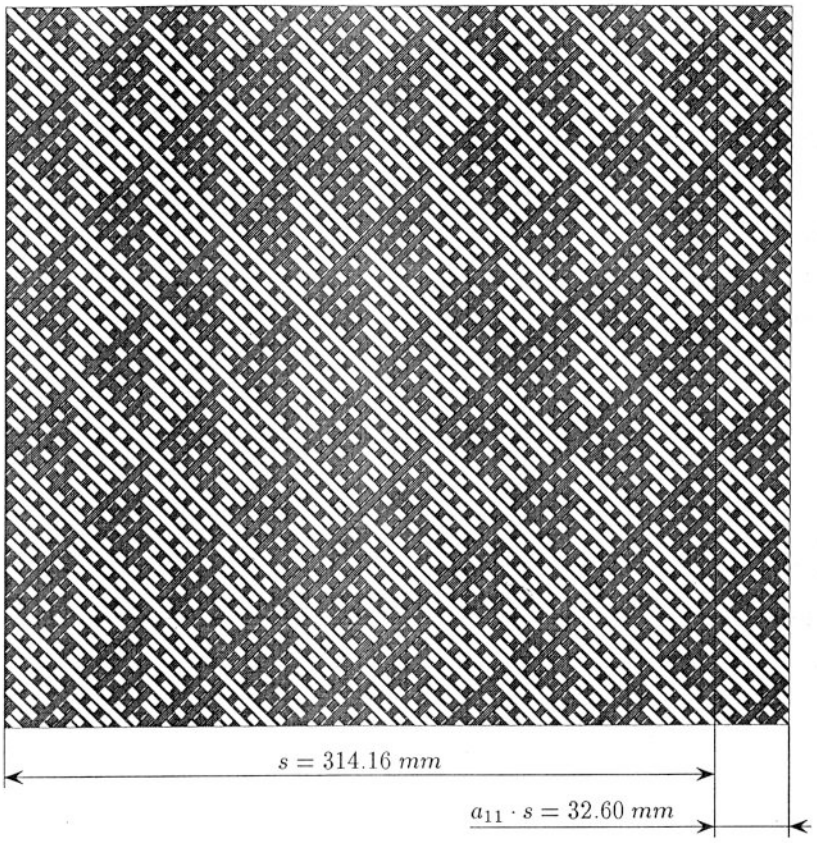
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/10



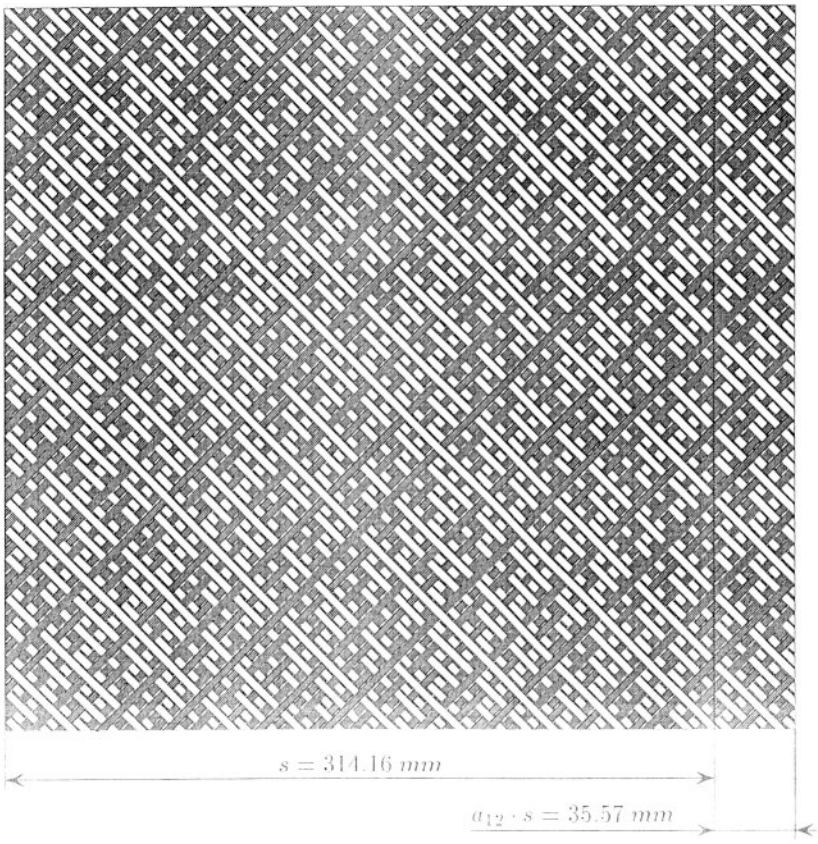
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/11



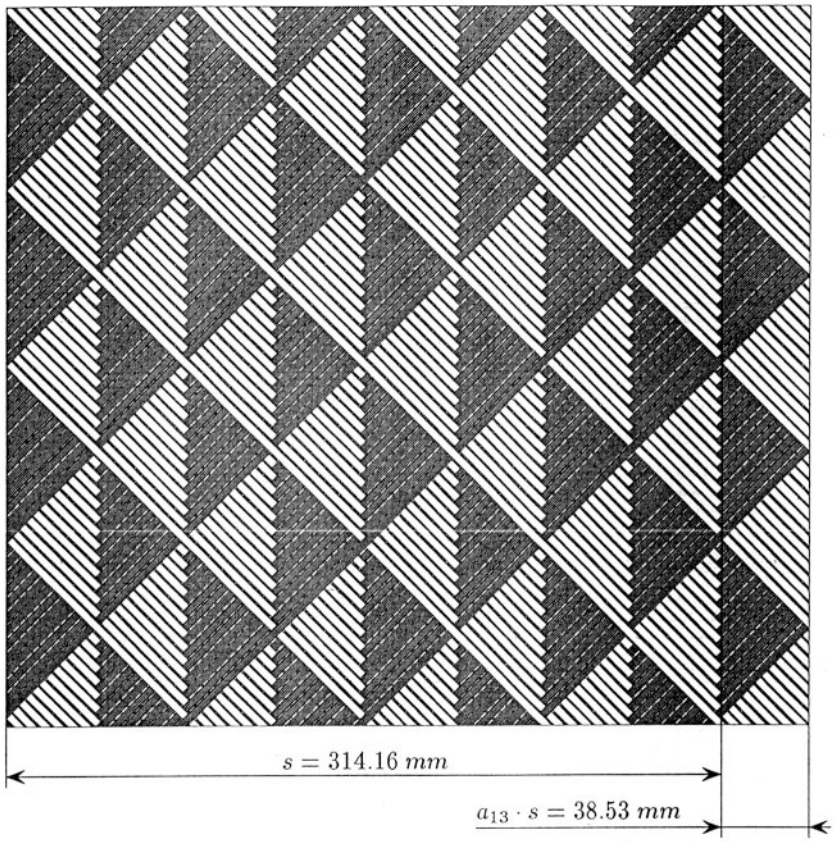
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/12



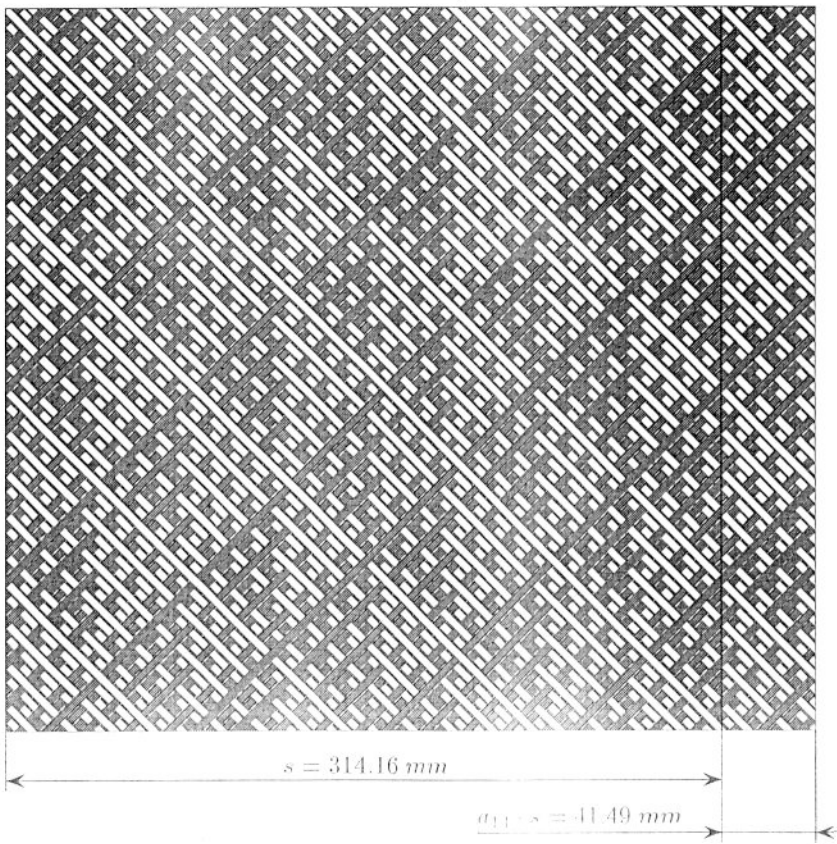
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/13



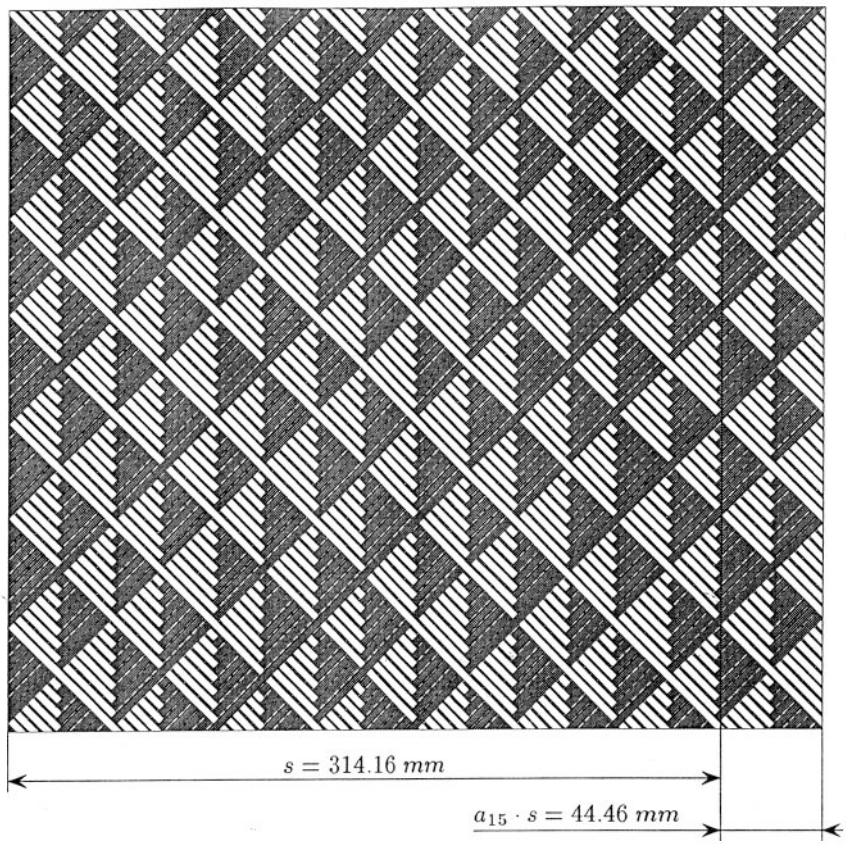
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/14



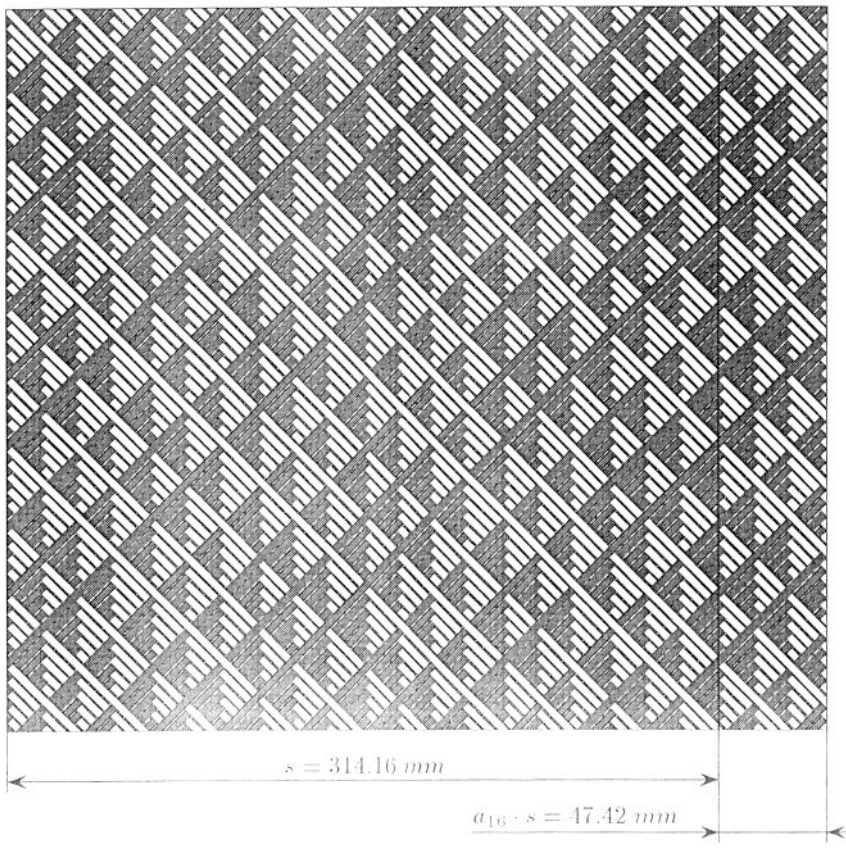
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/15



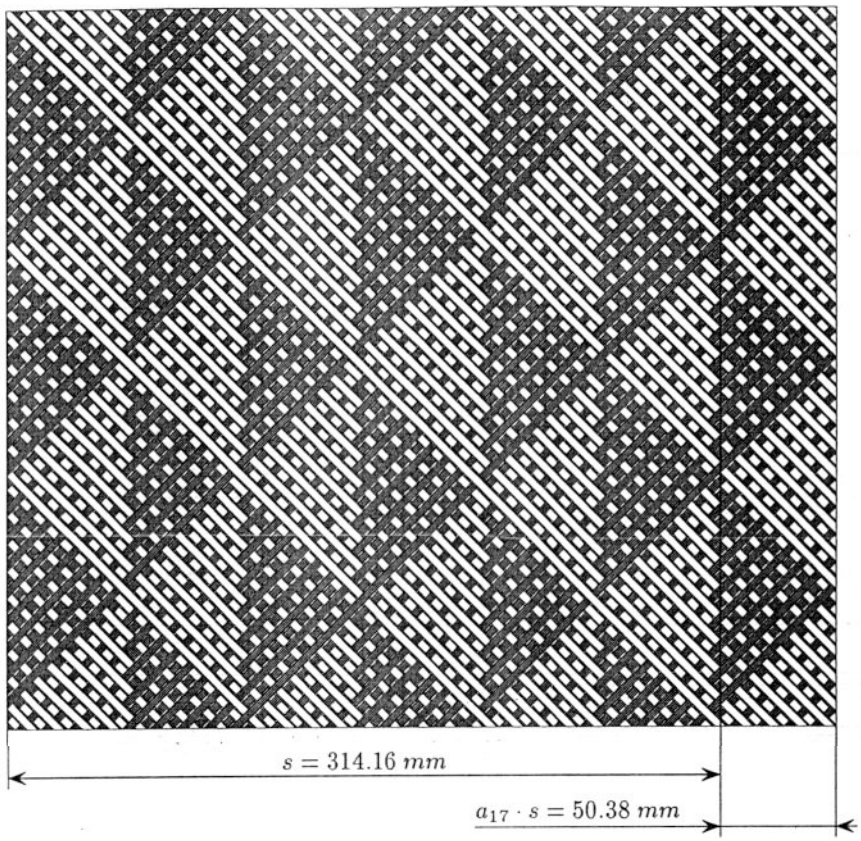
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/16



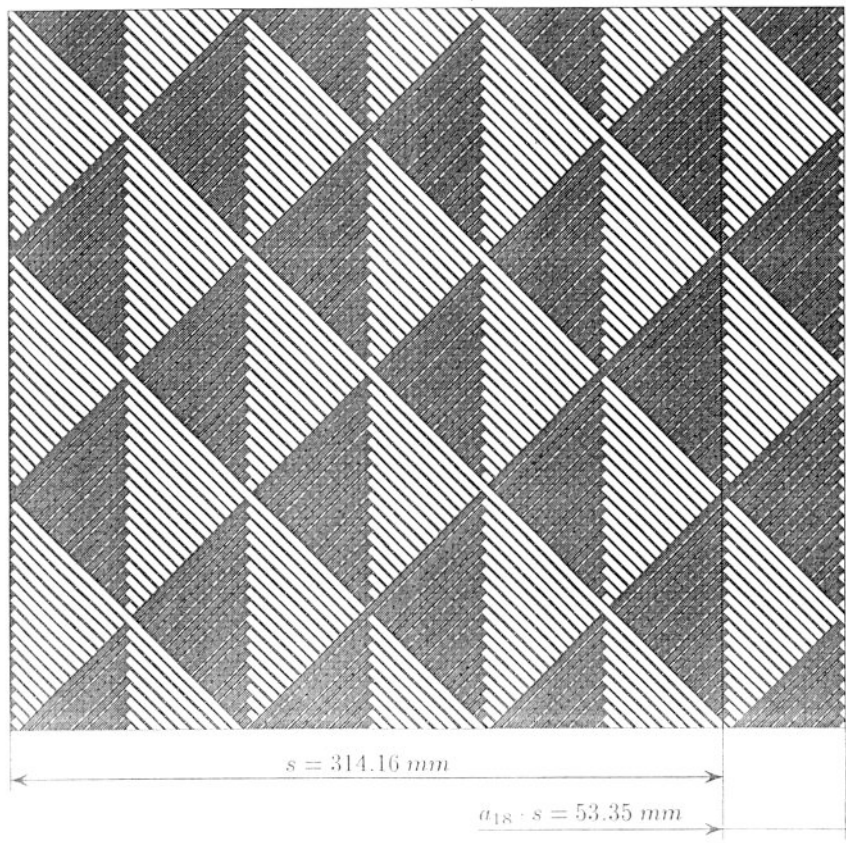
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/17



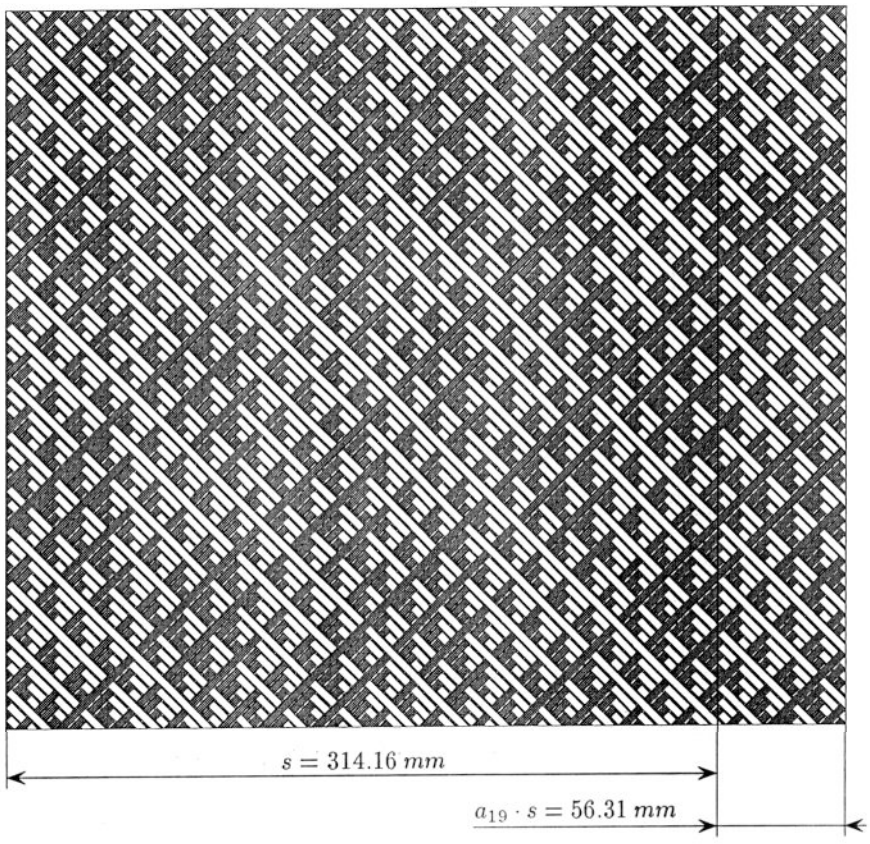
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/18



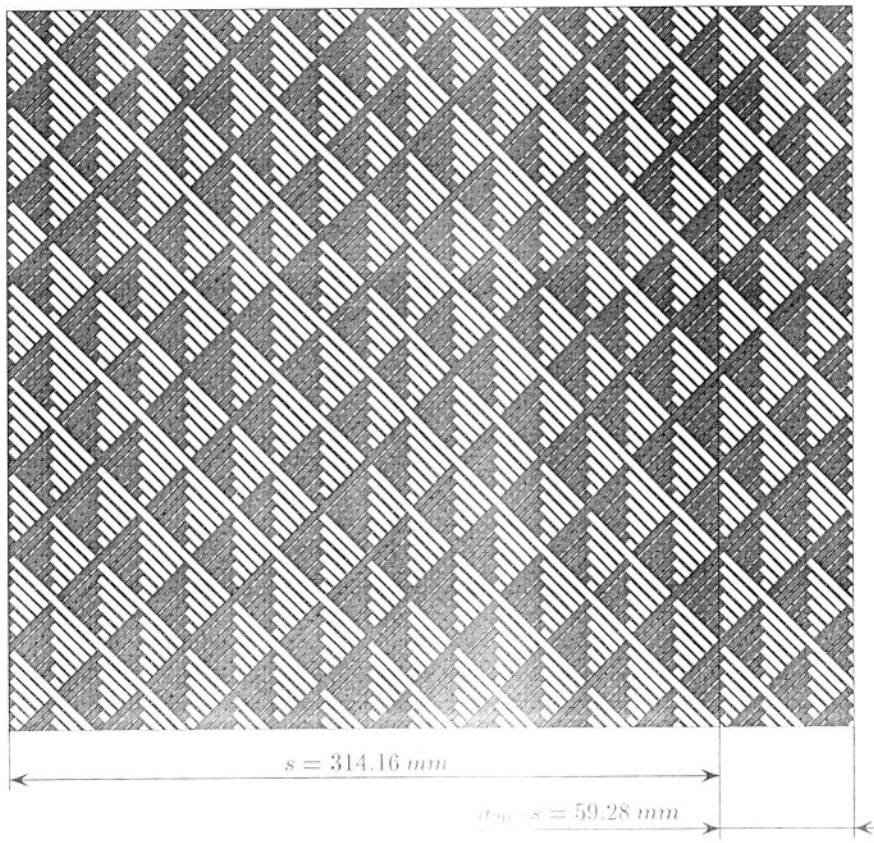
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 15.00°$

Tablica 53/19



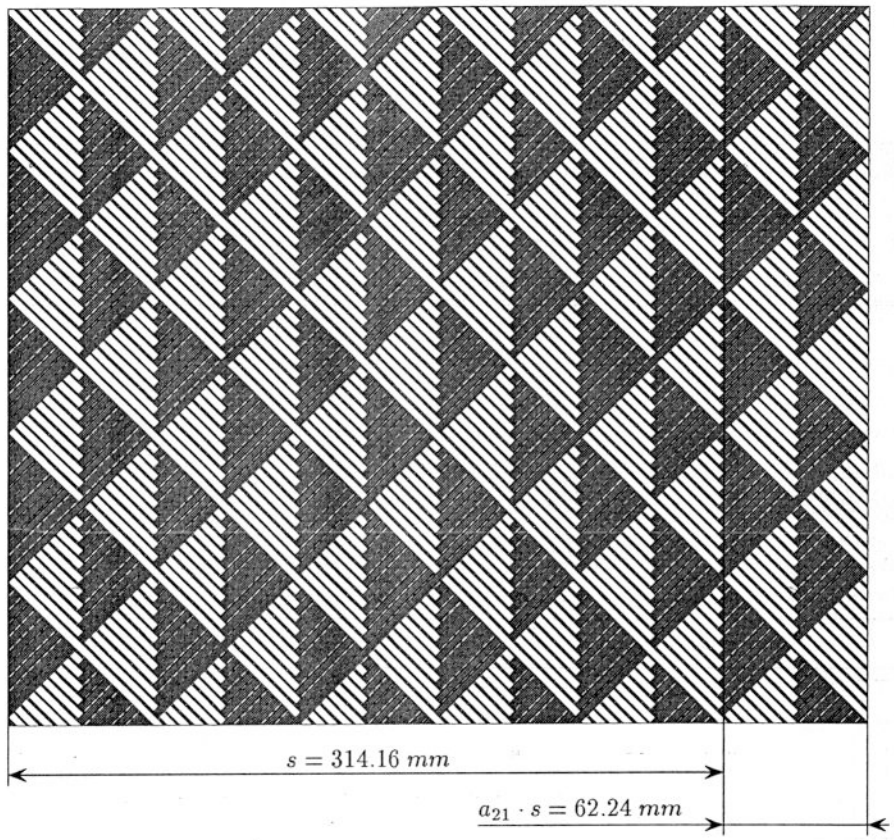
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/20



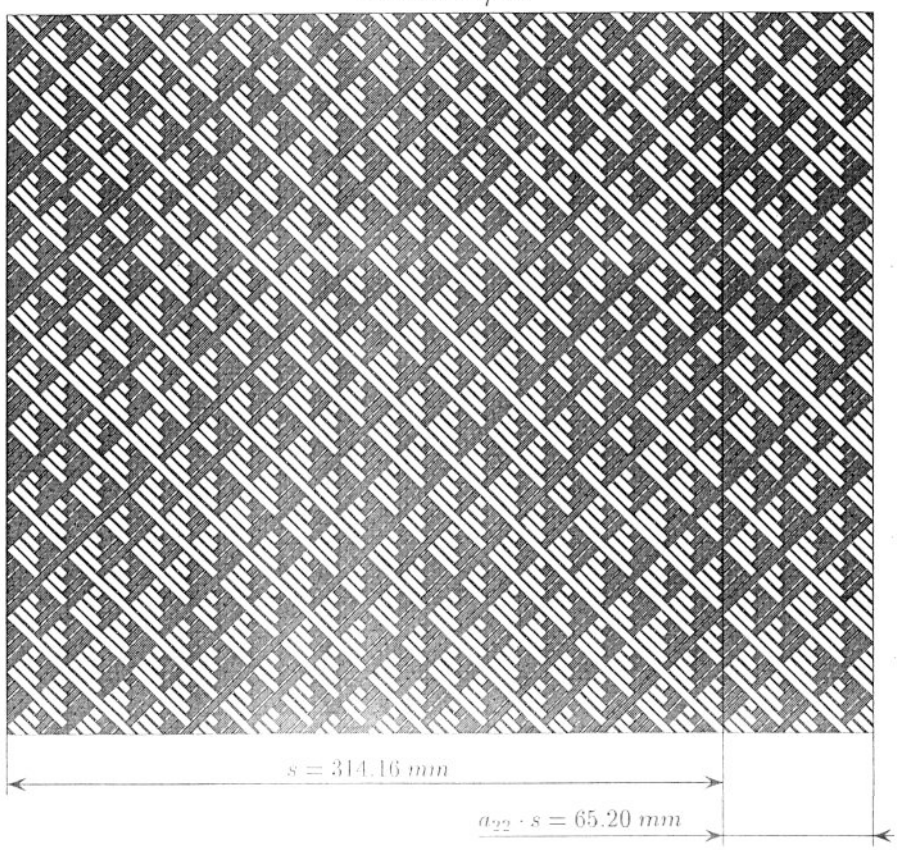
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/21



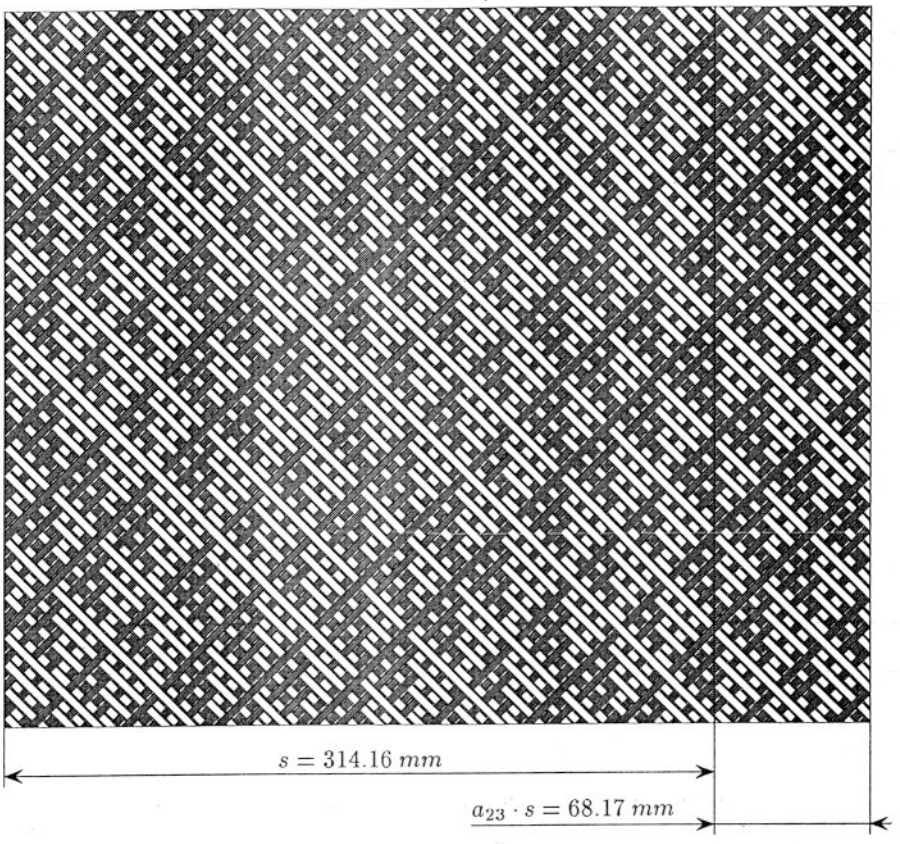
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/22



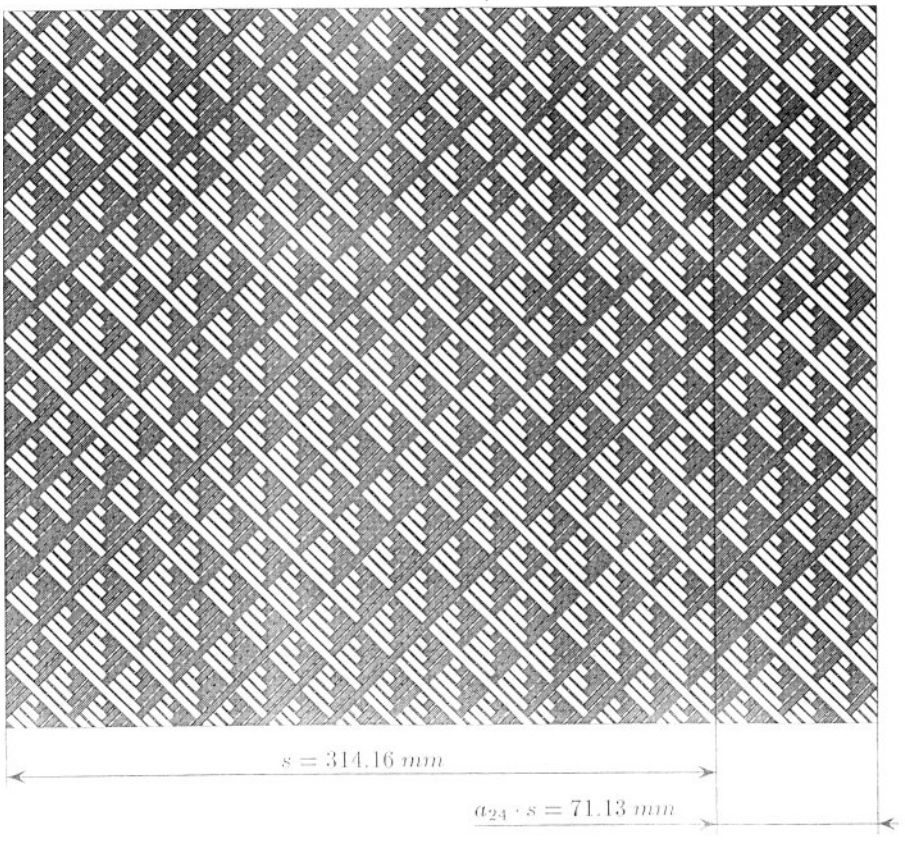
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/23



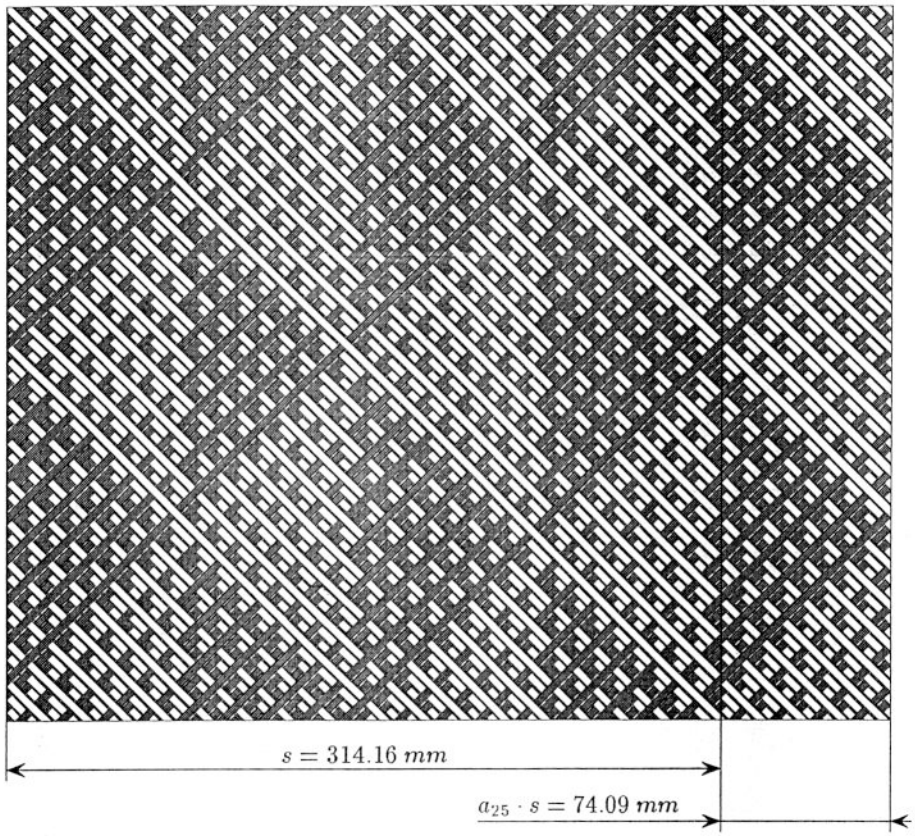
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/24



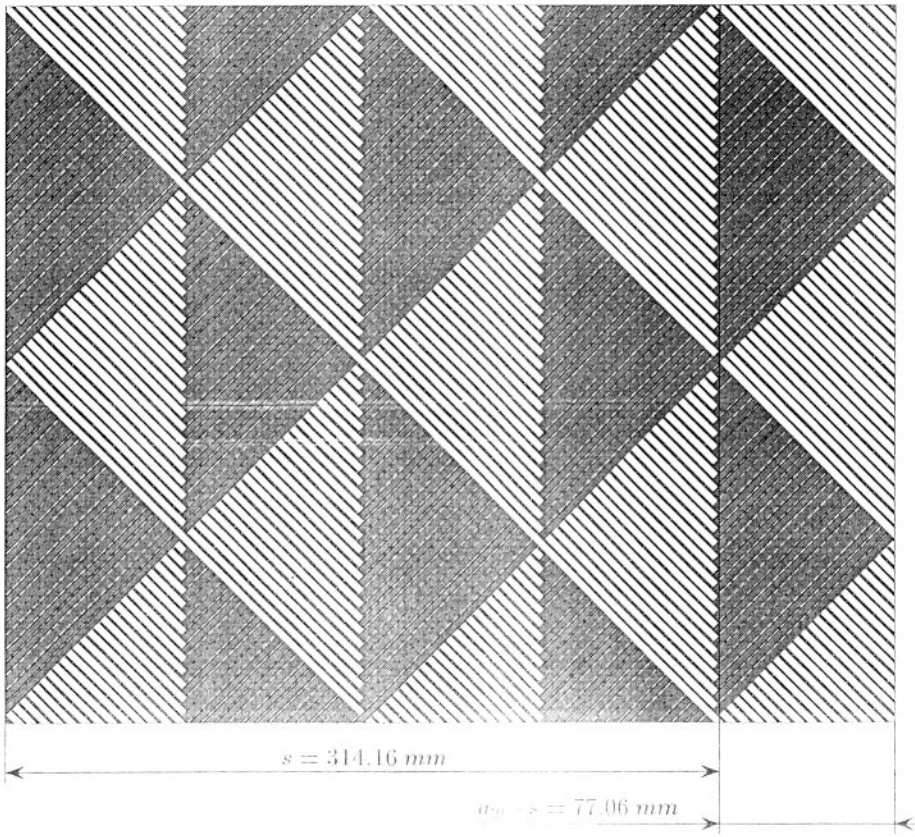
$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/25



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$

Tablica 53/26



$d = 100.00\ mm$
$\alpha = 45.00°$