

Krystyna Urbańska*

ZASTOSOWANIE SYSTEMU ARAMIS DO POMIARÓW ODKSZTAŁCEŃ KONSTRUKCJI MUROWYCH

Streszczenie

W pracy zamieszczono wyniki pomiarów przemieszczeń i odkształceń przeprowadzonych na fragmentach murów wykonanych z cegły pełnej. Badania przeprowadzono przy zastosowaniu systemu do bezkontaktowych trójwymiarowych pomiarów deformacji Aramis. Uzyskane wyniki posłużyły do wyznaczenia odkształceń średnich dla próbki oraz obserwacji propagacji powstających zarysowań.

Słowa kluczowe: system Aramis, odkształcalność muru, propagacja zarysowań

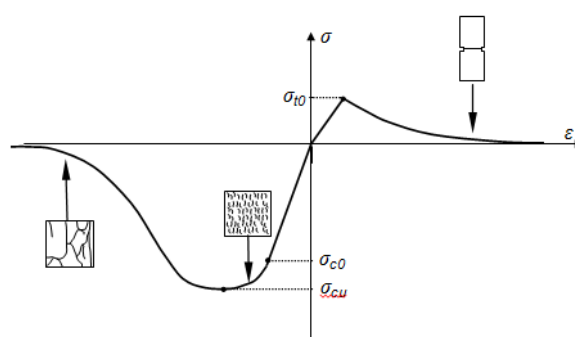
WPROWADZENIE

Ze względu na swoje znaczenie, konstrukcje murowe od lat są przedmiotem wielu rozważań i badań naukowych [Lewicki & Kubica 2000, Lewicki & Jarmontowicz & Kubica 2001, Bull 2001, Hendry 2001, Małyszko 2005, Jemioło & Małyszko 2013, Drobiec & Jasiński & Piekarczyk 2015 i Inni]. Obszarem zainteresowania są tematy związane z zastosowaniem nowoczesnych metod numerycznych i doświadczalnych w analizie konstrukcji murowych. Badania naukowe niejednokrotnie koncentrują się nad określeniem uniwersalnego modelu materiałowego, który w pełni charakteryzowałby zachowanie się muru pod obciążeniem. Przyczyną pewnych trudności jest dość trudny opis relacji konstytutywnych materiałów składowych.

Konstrukcję muru można rozważać jako materiał niejednorodny składający się z elementów murowych (cegły, pustaki, bloki) połączonych ze sobą w odpowiedni sposób zaprawą. Jego wytrzymałość zależy od wytrzymałości, odkształcalności i geometrii elementów murowych i zaprawy. O nośności muru decydują

* Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Instytut Budownictwa

również cechy samego muru takie jak: wiązanie elementów, grubość muru, występowanie spoin podłużnych oraz specyfika działającego obciążenia, niestety niektóre z nich są w normach traktowane drugorzędnie lub pomijane. Cechą elementów murowych jest również znacznie większa wytrzymałość na ściskanie niż rozciąganie, można je zatem uważać za materiały tzw. quasi-kruche. Niszczenie takich materiałów następuje wskutek postępującego rozwoju wewnętrznych mikrorys, które w efekcie narastającego obciążenia zamieniać się mogą w widoczne makrorysy. Generalnie dla tego typu materiałów można przyjmować, że zależność naprężeń od odkształceń w zakresie naprężeń do 33% wytrzymałości na ściskanie σ_{c0} oraz do wytrzymałości na rozciąganie σ_t ma przebieg liniowy. Po osiągnięciu tej granicy nośność materiałów rozciąganych maleje do zera, zaś ścisanych ulega osłabianiu po uprzednim wzmocnieniu (rys. 1).



Rys. 1. Wykres naprężenie - odkształcenie w próbach jednoosiowego ściskania i rozciągania wraz ze wskazaniem miejsc powstania pęknięć dla typowego materiału quasi-kruchego [Małyszko & Orłowicz 2000]

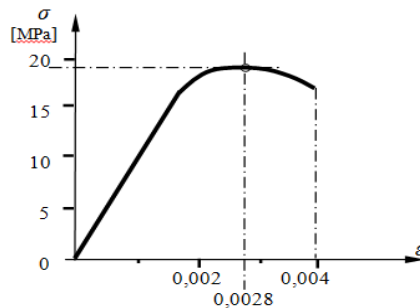
Fig. 1. Relation between stress and strain under uniaxial loading in compression and tension together with an indication of cracks for the typical quasi-brittle material [Małyszko & Orłowicz 2000]

Związki konstytutywne dla muru oraz dla jego materiałów składowych po przekroczeniu granicy wytrzymałości na rozciąganie lub ściskanie opisywane są często nieliniowymi zależnościami uwzględniającymi degradację struktury. Jednym ze sposobów dokładnego poznania pracy konstrukcji murowej pod wpływem działającego obciążenia są badania doświadczalne.

W pracy zaprezentowano możliwości systemu do bezkontaktowych trójwymiarowych pomiarów deformacji ARAMIS v6 2008. Pozwala on na śledzenie rozkładu odkształceń w murze, obserwację nierównomiernego przekazywania obciążenia z jednej warstwy na drugą, analizę propagacji zarysowań. Uzyskane w ten sposób informacje przydatne mogą być przy analizie zachowania muru pod obciążeniem przeprowadzonej metodami numerycznymi.

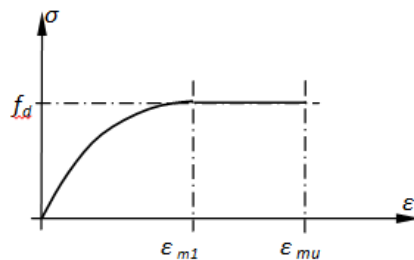
ODKSZTAŁCALNOŚĆ MURU

Na odkształcalność muru ma wpływ kształt, wielkość i rodzaj elementów murowych, udział zaprawy w objętości muru, szybkość przyrostu obciążenia oraz wiek muru w chwili obciążenia. Według badań prowadzonych przez [Meyer & Schubert 1991] ze stałym przyrostem obciążenia, średnia wartość odkształcenia granicznego ε_u dla murów wykonanych z cegły pełnej wynosi 0,003 (0,002 - 0,0038). Natomiast w pracy [Hendry i in. 1997] dla murów z cegły pełnej wartość odkształcenia ε_u szacuje się na 0,004. Przebieg zależności $\sigma(\varepsilon)$ z przytoczonej pracy przedstawiony został na (rys. 2).



Rys. 2. Związek naprężenie - odkształcenie wg [Hendry i in. 1997]
Fig. 2. Relation between stress - strain by [Hendry i in. 1997]

Według badań [Kubicy 1995] wartości ε_u wahały się zależnie od kształtu elementu badawczego od 0,001492 do 0,002971. Większe wartości odkształceń uzyskano dla fragmentu muru o mniejszych wymiarach. Obok zależności $\sigma(\varepsilon)$ otrzymywanych na drodze doświadczalnej, które bezsprzecznie wiernie oddają przebieg zmienności tej funkcji można przyjmować do obliczeń funkcje uproszczone. Norma [PN-EN 1996-1-1:2010] mówi, że do analizy i wymiarowania murów wykonanych z elementów grupy 1, można przyjmować zależność $\sigma(\varepsilon)$ jako paraboliczno - prostokątną.



Rys. 3. Paraboliczno - prostokątna postać związku $\sigma(\varepsilon)$ [PN-EN 1996-1-1:2010]
Fig. 3. Parabolic - rectangular form of relationship $\sigma(\varepsilon)$ [PN-EN 1996-1-1:2010]

Na rysunku 3 odkształcenie ε_{ml} odpowiada naprężeniu równemu wytrzymałości muru na ściskanie. Odkształcenie graniczne zaś ε_{mu} zgodnie z normą przyjmuje wartości -0,0035 (dla elementów murowych klasy 1) oraz -0,0020 (dla elem. klasy 2, 3, 4).

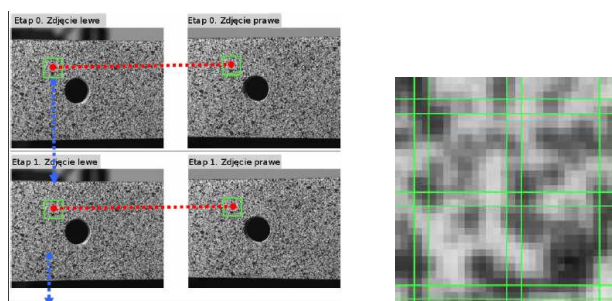
METODYKA BADAŃ

Do pomiaru odkształceń na powierzchni próbek użyty został nowoczesny system do bezkontaktowych trójwymiarowych pomiarów deformacji [ARAMIS v6 2008]. Odczytów przemieszczeń dokonuje za pomocą dwóch szybkich kamer umieszczonych na specjalnym statywie (trójnogu) i ramieniu.

System ARAMIS pozwala na pomiar w określonym obszarze próbki przemieszczeń 3D, prędkości przemieszczeń i odkształceń. Pola pomiarowe mogą mieć wymiary od 20 x 20 mm do 200 x 200 mm. Dokładność wyznaczania przemieszczeń jest rzędu 1 μm , natomiast odkształceń co najmniej 0,01 %.

Aramis na podstawie zdjęć wykonanych cyfrowymi kamerami rozpoznaje strukturę powierzchni mierzonego obiektu (każdemu pikselowi na zdjęciu są przypisane odpowiednie współrzędne). Pierwsze zdjęcie jest traktowane jako zdjęcie obiektu przed obciążeniem (brak deformacji). Kolejne zdjęcia nagrywane są w trakcie lub po obciążeniu.

Po nagraniu wszystkich zdjęć ARAMIS porównuje je między sobą przypisując charakterystycznym punktom kwadratowe lub prostokątne małe płaszczyzny zwane fasetkami, a następnie odszukuje te charakterystyczne punkty na kolejnych zdjęciach (rys. 4). Następnie oblicza przemieszczenia i odkształcenia charakterystycznych dla danego obiektu punktów.



Rys. 4. Przykładowy widok z kamer systemu ARAMIS oraz widok fasetek 15 x 15 pikseli [Aramis v6 2008]

Fig. 4. Example view of the cameras system ARAMIS and view of facets 15 x 15 pixels [Aramis v6 2008]

Mur jest materiałem, którego powierzchnia ma niewiele punktów charakterystycznych. Zatem niezbędne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni

tj. stworzenie losowego deseni za pomocą farby w sprayu (fot. 1). Należy zaznaczyć, że poprawne przygotowanie powierzchni próbki oraz równomierne oświetlenie w trakcie badania ma ogromny wpływ na poprawność odczytu.



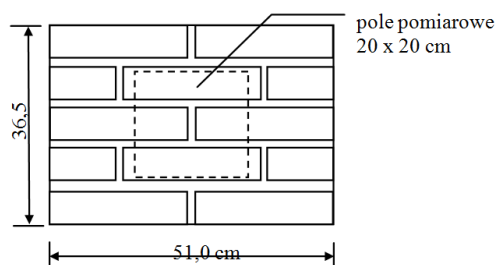
Fot. 1. Przygotowany do badań element próbny MV
Phot. 1. Prepared for the tests of specimen MV

W trakcie badań obciążenie przykładane było do górnej płaszczyzny próbek, prostopadle do spoin wspornych za pośrednictwem stalowej płyty o wymiarach 260 x 120 x 20 mm oraz spoczywającego na płycie stalowego trawersu o grubości 60 mm (fot. 2).



Fot. 2. Próbkę MV podczas testu ściskania
Phot. 2. Specimen MV during the compressing test

W trakcie badania zwiększano jednostajnie przemieszczenie v ze stałą prędkością 0,01 mm/s. W trakcie przebiegu badań automatycznie rejestrowany był, z maszyny wytrzymałościowej INSTRON, przebieg zależności siły F od przemieszczenia v oraz odczyt przemieszczeń z pola pomiarowego przez system Aramis. Kamery do pomiaru przemieszczeń ustawiono zgodnie z wymaganiami systemu w odległości 77,5 cm od powierzchni modeli MV. Przemieszczenia odczytywane były z pola pomiarowego o powierzchni 400 cm² (rys. 5).



Rys. 5. Położenie pola pomiarowego na próbce
Fig. 5. The location of the measurement on a sample

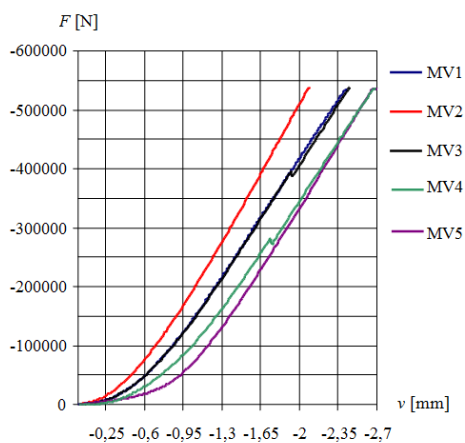
W poniższej tabeli zamieszczono informacje na temat liczby i częstotliwości wykonania zdjęć.

Tab. 1. Informacje dotyczące badań systemem Aramis

Tab. 1. Information on the research system Aramis

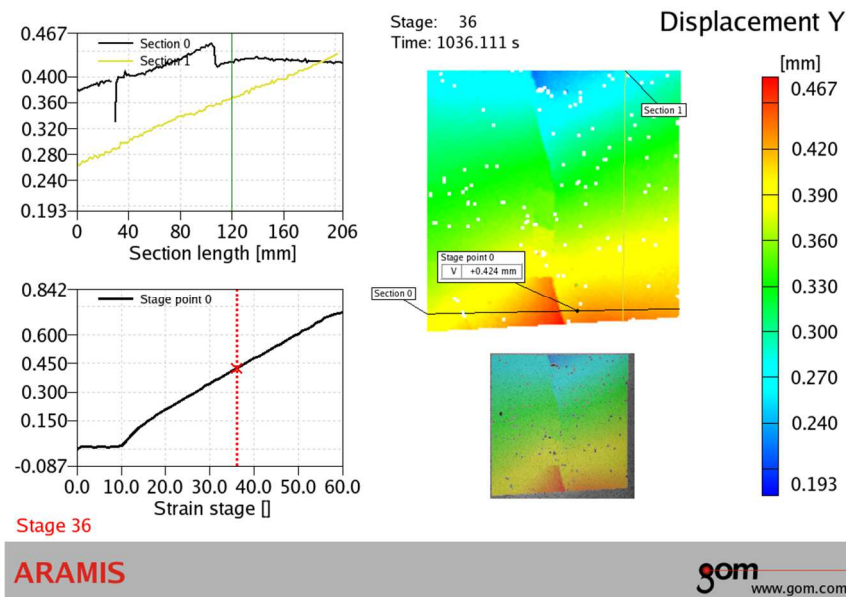
Symbol próbki	Liczba zdjęć	Częstotliwość wykonania zdjęć	Uwagi
MV1	60	10 sek	
MV2	59	5 sek	
MV3	brak	brak	złe oświetlenie próbki
MV4	60	5 sek	
MV5	80	5 sek	

Wykres (rys. 6) przedstawia natomiast uzyskane wyniki z maszyny INSTRON dla pięciu przebadanych próbek.



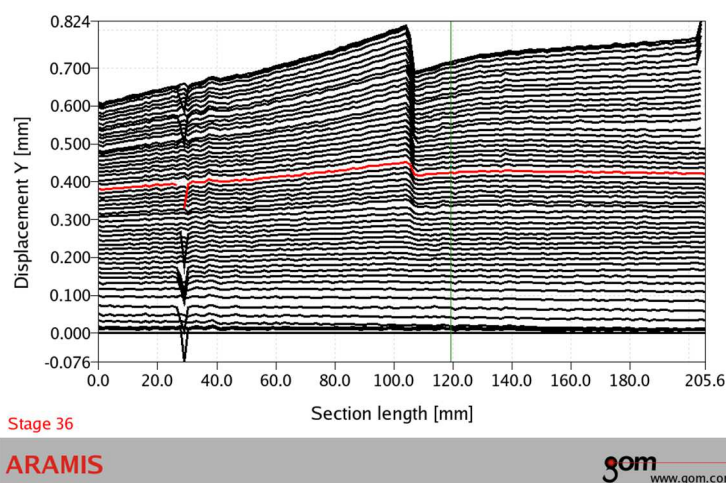
Rys. 6. Zależność siła F - przemieszczenie v przy badaniu próbek typu MV
Fig. 6. Load F - displacement v curves for MV specimens

Badanie przy zastosowaniu systemu Aramis, ze względu na ograniczone możliwości ustawienia statywu podtrzymującego kamery w stosunku do mierzonego obiektu wykonano przy obróconych o 180° kamerach, co spowodowało otrzymywanie obróconych obrazów map rozkładu mierzonych wielkości. Poniżej przedstawiono otrzymane mapy rozkładów przemieszczeń i odkształceń dla obserwowanego pola dla próbki MV1 przy obciążeniu wynoszącym około 240 kN, czyli dla poziomu odpowiadającego 1/3 wartości maksymalnej siły niszczonej element próbny. Dla próbki MV1 wybrano wyniki wykonane dla 36 zdjęcia (siła wynosiła 239,897 kN). Na rysunku 7 przedstawiono typowy raport z systemu ARAMIS dla próbki MV1. Zawiera on dwa wykresy oraz mapę rozkładu przemieszczenia pionowego w polu pomiarowym. Pod nią znajduje się dodatkowo obraz z kamery wraz z naniesioną mapą rozkładu prezentowanej wielkości. Przemieszczenia pionowe na wysokości pola pomiarowego zmieniają się liniowo od 0,45 mm do 0,26 mm. Na górnym wykresie przedstawiono wartości przemieszczenia pionowego w przekroju Section 0 i Section1. Dolny wykres przedstawia zmianę wartości przemieszczenia dla wybranego punktu w polu pomiarowym w całym procesie obciążania.



Rys. 7. Przemieszczenie pionowe próbki MV1 - raport z systemu Aramis
Fig. 7. Vertical displacement of the sample MV1 - report from the Aramis

Na rysunku 8 przedstawiono wykres, który ilustruje zmianę przemieszczenia pionowego w poziomym przekroju Section 0 w całym procesie obciążania próbki.

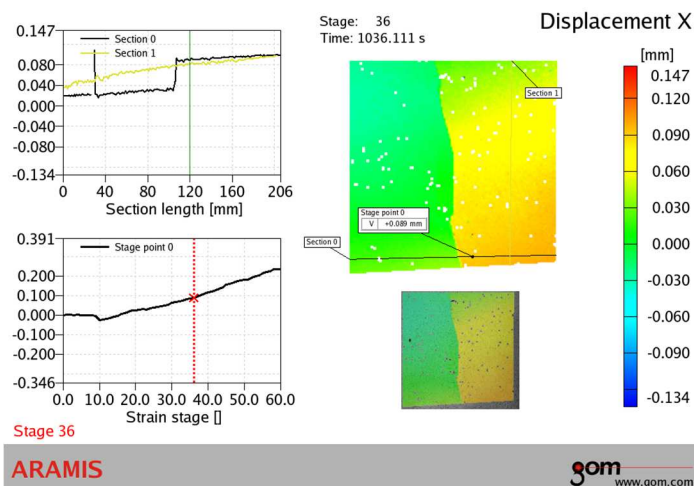


Rys. 8. Przeszczenie pionowe w przekroju Section 0

Fig. 8. Vertical displacement in section Section 0

Linia czerwoną oznaczono przeszczenie w przekroju odpowiadające 36 zdjęciu. Powyżej tego zdjęcia ze względu na pojawienie się rysy pionowej w próbce rozkład przeszczenia w tym przekroju przestaje być linią prostą.

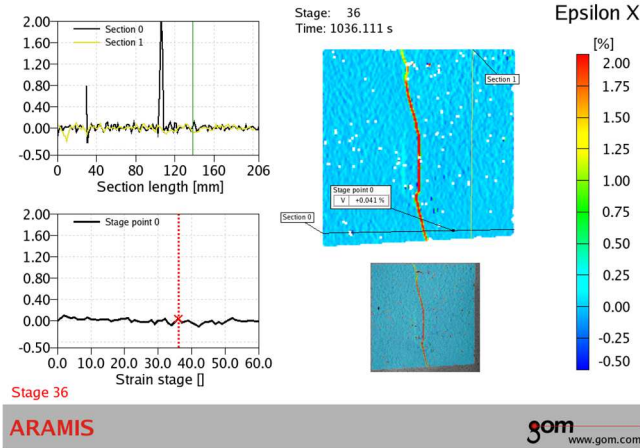
Rysunek 9 przedstawia raport dotyczący przeszczenia poziomego w polu pomiarowym. Mapa rozkładu przeszczenia obrazuje miejsce pojawienia się rysy na krawędzi dwóch kolorów żółtego i zielonego.



Rys. 9. Przeszczenie poziome próbki MV1 - raport z systemu Aramis

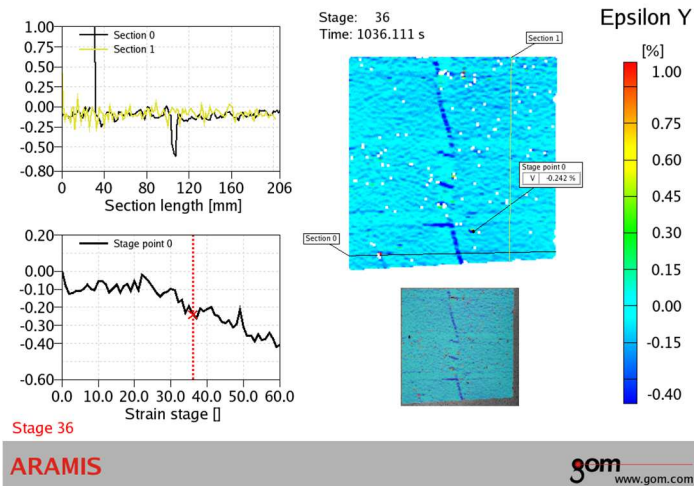
Fig. 9. Horizontal displacement of the sample MV1 - reports from the Aramis

Jeszcze dokładniej pionową szczelinę obrazuje raport przedstawiający odkształcenia poziome ε_x . Kolorem czerwonym na mapie przedstawiono pojawiającą się w trakcie badania rysę przebiegającą wzdłuż spoiny pionowej.



Rys. 10. Odkształcenie poziome próbki MV1 - raport z systemu Aramis
 Fig. 10. Horizontal strain of the sample MV1 - reports from the Aramis system

Kolejny rysunek 11 przedstawia informacje dotyczące odkształceń pionowych ε_y . Ponownie obserwowano koncentrację odkształceń wzdłuż spoiny pionowej.



Rys. 11. Odkształcenie pionowe próbki MV1 - raport z systemu Aramis.
 Fig. 11. Vertical strain of the sample MV1 - reports from the Aramis system

Otrzymane dane dają możliwość dokładnego prześledzenia zachowania się konstrukcji murowej od zakresu sprężystego, aż do zniszczenia próbki. Na podstawie uzyskanych pomiarów przemieszczeń i odkształceń można wyznaczyć także średnie odkształcenia $\bar{\epsilon}_{x(0,33)}$, $\bar{\epsilon}_{y(0,33)}$ z pola pomiarowego systemu Aramis wg zależności

$$\bar{\epsilon}_{y(0,33)} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{iy(0,33)}}{n}, \quad \bar{\epsilon}_{x(0,33)} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{ix(0,33)}}{n}$$

gdzie:

$\epsilon_{iy(0,33)}$, $\epsilon_{ix(0,33)}$ - odkształcenie pionowe i poziome obliczone przez system dla fasetki dla poziomu odpowiadającego 0,33 siły niszczącej
 n - liczba fasetek, z których dokonano odczytu.
 Odkształcenia średnie zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Średnie odkształcenia z systemu Aramis

Tab. 2. Average values of strain measured by Aramis system

Symbol próbki	$\bar{\epsilon}_{x(0,33)}$	$\bar{\epsilon}_{y(0,33)}$
MV1	0,00041	0,0020
MV2	0,00035	0,0019
MV3	brak	brak
MV4	0,00040	0,0021
MV5	0,00045	0,0025

PODSUMOWANIE

Otrzymane wartości średnich odkształceń z pola pomiarowego porównywalne są z wynikami uzyskiwanymi przez innych autorów. System Aramis pozwala dodatkowo na pełną rejestrację pola przemieszczeń i odkształceń w obserwowanym obszarze co jest szczególnie przydatne do weryfikacji modeli numerycznych.

Obserwowane pole pomiarowe przez system Aramis zawiera reprezentatywny podobszar muru. Wyznaczane dla tego podobszaru uśrednione wartości mechaniczne są szczególnie przydatne w tzw makroskopowym opisie muru.

LITERATURA

1. ARAMIS v6 2008. Podręcznik użytkownika - oprogramowanie, GOM Optical Measuring techniques.

2. Bull W.; 2001. Computational Modeling of masonry, Brickwork and Blockwork Structures, Saxe-Coburg Publications, Chap. 1, 2, 8, 9.
3. DROBIEC Ł, JASIŃSKI R., PIEKARCZYK A.; 2015. Konstrukcje murowe według Eurokodu 6 i norm związanych tom I i II, Wyd. PWN Warszawa.
4. HENDRY A.W., SINA B. P., DAVIES S. R.; 1997. Design of masonry structures, E & FN SPON.
5. Hendry A.W.; 2001. Masonry walls: materials and construction, Construction and Building Materials 15, 323-330.
6. JEMIOŁO S., MAŁYSZKO L.; 2013. MES i modelowanie konstytutywne w analizie zniszczenia konstrukcji murowych tom 1, Wyd. UWM, Olsztyn.
7. KUBICA J.; 1995. Ściany z cegły w złożonym stanie naprężenia, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice.
8. KUBICA J.; 1995. Badania zależności σ - ε niezbrojonych murów z cegły, XLI Konferencja Naukowa, Kraków-Krynica, 21-28.
9. LEWICKI B., JARMONTOWICZ R., KUBICA J.; 2001. Podstawy projektowania niezbrojonych konstrukcji murowych, Wyd. ITB Warszawa.
10. MAŁYSZKO L., ORŁOWICZ R.; 2000. Konstrukcje murowe zarysowania i naprawy, Wyd. UWM, Olsztyn.
11. MAŁYSZKO L.; 2005. Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uwzględnieniem anizotropii, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn.
12. MEYER U., SCHUBERT P.; 1991. Spannungs - Dehnungs - Linien von Mauerwerk, Proceeding of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, Vol. 3, 1306-1312.
13. PN-EN 1996-1-1:2010 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.

APPLICATION of ARAMIS SYSTEM FOR MEASUREMENT OF DEFORMATIONS OF MASONRY

Summary

The paper presents the results of measurements of displacements and strains obtained on fragments of walls made of bricks. In addition to the Instron measurements, the displacements were measured on the specimen surface by using the modern non-contact measuring system ARAMIS,

which has a direct interface with the strength testing machine and determines displacements by means of two cameras. The results were used to determine the average strain and the observation of the propagation of cracks in masonry panel.

Key words: system Aramis, deformability of the masonry, *propagation of cracks*