

ДЕКОМПРЕСИЯ, ПАСИВНИ ШАРНИРИ И АДАПТИРАНО РАВНОВЕСИЕ НА ЗИДАНИ АРКИ

доц. д-р Нели Димитрова Тризлова
Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“ – Варна

Абстракт: Зиданите арки са едни от най-разпространените конструктивни системи в историческото строително наследство, чието механично поведение се определя от взаимодействието между геометрията, свойствата на зидарията и преразпределението на вътрешните усилия. В статията е предложена хипотеза за механичното поведение на зиданите арки, основана на последователното развитие на декомпресия, формиране на пасивни шарнири и достигане на ново равновесно състояние. Приема се, че образуването на три пасивни шарнира превръща арката в адаптирана тришарнирна система, способна да поеме измененото натоварване, докато появата на четвърти шарнир е следствие от локални нарушения, като неравномерни слягания, локални повреди или извънредни въздействия. Предложеният механичен модел е илюстриран аналитично и е проверен чрез анализ на реални исторически зидани мостове с документиран пукнатини и зони на декомпресия. Получените резултати показват, че локалните повреди не са непременно признак за непосредствена загуба на носимоспособност, а често представляват естествен етап от преразпределението на усилията и адаптацията на конструкцията към променените условия на работа. Разработеният подход предлага физически обоснована основа за интерпретиране на повредите, оценка на техническото състояние и избор на подходящи мерки за укрепване и опазване на исторически зидани конструкции.

Ключови думи: зидани арки; механично поведение; декомпресия; пасивни шарнири; тришарнирна система; преразпределение на вътрешните усилия; исторически зидани конструкции; обследване; укрепване.

DECOMPRESSION, PASSIVE HINGES AND ADAPTED EQUILIBRIUM OF MASONRY ARCHES

Assoc. Prof. Dr. Neli Dimitrova Trizlova
Varna Free University “Chernorizets Hrabar” – Varna

Abstract: Masonry arches are among the most widespread structural systems in the built architectural heritage, and their mechanical behavior is governed by the interaction between geometry, masonry properties, and the redistribution of internal forces. This paper proposes a hypothesis describing the mechanical behavior of masonry arches based on the sequential

development of decompression, the formation of passive hinges, and the establishment of a new equilibrium state. It is assumed that the formation of three passive hinges transforms the arch into an adapted three-hinged system capable of sustaining the modified loading conditions, whereas the appearance of a fourth hinge results from local disturbances such as differential settlements, localized damage, or exceptional loading. The proposed mechanical model is illustrated through analytical interpretation and verified by means of documented case studies of historic masonry arch bridges exhibiting characteristic crack patterns and decompression zones. The results indicate that localized damage does not necessarily signify an imminent loss of load-bearing capacity but frequently represents a natural stage in the redistribution of internal forces and the structural adaptation of the arch to altered service conditions. The proposed approach provides a physically based framework for interpreting damage mechanisms, assessing the structural condition, and selecting appropriate conservation and strengthening measures for historic masonry structures.

Keywords: masonry arches; mechanical behavior; decompression; passive hinges; three-hinged system; internal force redistribution; historic masonry structures; structural assessment; strengthening.

1. Въведение

В първата част на настоящото изследване беше проследено историческото развитие на аналитичните модели за изследване на аркови конструкции и беше показано, че устойчивостта на масивните сводови системи е преди всичко геометричен проблем, определян от положението на линията на натиск в рамките на напречното сечение [1]. Класическите подходи на Хук, Кулон, Мери и Навие доказват, че докато тази линия остава в допустимите граници, конструкцията работи изцяло на натиск и запазва своето стабилно равновесие.

Реалната експлоатация на историческите арки обаче рядко протича при идеализирани условия. Промени в натоварването, температурни въздействия, слягане на опорите, земетръсни въздействия и локални повреди често водят до изместване на линията на натиск извън границите на ядрото на сечението. Това предизвиква локална декомпресия, отваряне на контактните фуги и формиране на механични стави, които постепенно трансформират първоначалната статическа схема.

Настоящата втора част разглежда именно този преходен стадий на работа — от първоначалната безшарнирна арка към формирането на тришарнирна система като ново устойчиво равновесно състояние. Основната цел е да се изследва механизмът на

адаптация на арката към изменените гранични и контактни условия и да се покаже, че появата на пукнатини и пасивни шарнири не представлява непременно загуба на носимоспособност, а може да бъде част от процес на механична адаптация, свързан с преразпределение на вътрешните усилия.

2. Механизъм на декомпресията в арковите системи

При идеализирано равновесно състояние линията на натиск преминава изцяло в границите на напречното сечение на арката, като зидарията работи преимуществено на натиск. Положението на линията на натиск спрямо геометричния център на сечението определя характера на разпределението на нормалните напрежения и степента на използване на контактната повърхност между отделните блокове.

При реални експлоатационни условия изменението на натоварването, температурните деформации, неравномерното слягане на опорите, динамичните въздействия или локалните повреди могат да доведат до изменение на вътрешните усилия и съответно до преместване на линията на натиск към периферията на сечението. Положението на линията на натиск може да бъде характеризирano чрез ексцентрицитета:

$$e = \frac{M}{N}$$

където M е огъващият момент, а N е нормалната натискава сила в разглежданото сечение.

За правоъгълно напречно сечение с височина h условието резултантната натискава сила да остава в границите на ядрото на сечението се записва във вида:

$$e \leq \frac{h}{6},$$

При изпълнение на това условие нормалните напрежения по цялата височина на сечението остават натискови и между съседните блокове се запазва пълен контакт. В този стадий фугата участва с цялата си контактна повърхност в предаването на натисковите усилия.

Когато ексцентрицитетът на натисковата резултанта надвиши границата на ядрото,

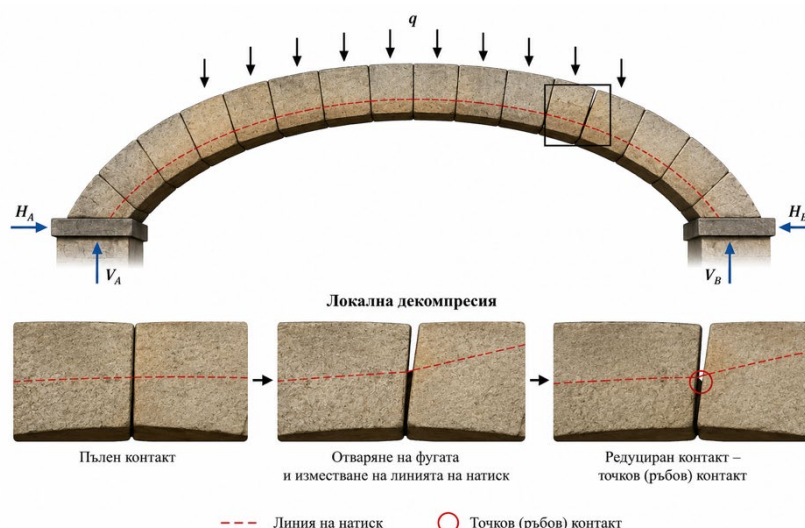
$$e \geq \frac{h}{6},$$

линейното разпределение на напреженията, получено при допускане за материал, работещ на опън и натиск, би довело до възникване на опънни напрежения в част от сечението. При зиданите конструкции обаче способността за поемане на опън по контактните фуги е ограничена и в класическия модел на зидария без опън тези напрежения не могат да бъдат предадени.

В резултат започва локална декомпресия на фугата. Част от контактната повърхност се отваря и престава да участва в предаването на нормалните усилия, а натисковата сила се пренася през останалата активна контактна зона [6]. По този начин ефективната височина на натиснатата зона намалява, а разпределението на контактните напрежения се изменя.

С прогресирането на декомпресията активната контактна зона постепенно се стеснява и положението на натисковата резултанта се измества към единия ръб на фугата. Процесът може да бъде разглеждан като последователен преход от пълен контакт към частичен контакт и, в граничния идеализиран случай, към ръбов контакт (фиг. 1).

При достигане на ръбов контакт способността на разглежданото сечение да предава огъващ момент чрез разпределена контактна зона е силно ограничена. В рамките на идеализирания модел на зидария без опън това гранично състояние може да бъде интерпретирано като формиране на **пасивен шарнир**, около който става възможна относителна ротация на съседните блокове.



Фиг. 1. Начален стадий на декомпресия в аркова конструкция: изместване на линията на натиск, локално отваряне на фугата и редукция на контактната зона до ръбов контакт.

Следователно напускането на линията на натиск от границите на ядрото на сечението не следва автоматично да се отъждествява с разрушение на арката. То определя началото на процес на частична декомпресия и изменение на активната контактна зона. Едва последващото развитие на този процес и формирането на система от пасивни шарнири може да доведе до съществена промяна на първоначалната статическа схема.

3. Формиране на пасивни шарнири и промяна на статическата схема

Формирането на пасивен шарнир представлява съществен етап в механичната еволюция на зиданата арка. За разлика от конструктивните шарнири, които предварително се въвеждат в изчислителната схема и чието положение е известно, пасивните шарнири възникват в процеса на експлоатация вследствие на локална декомпресия и достигане на гранично контактено състояние в определени фуги.

В идеализирания механичен модел пасивният шарнир се характеризира с възможност за относителна ротация между съседните части на конструкцията при запазване на предаването на натисковата сила. В зоната на шарнира натисковата резултанта се предава през локализираната контактна зона в ръба на фугата. При граничен ръбов контакт моментът на натисковата резултанта спрямо точката на контакта е нулев, което позволява тази зона да бъде идеализирана като пасивен шарнир. По този начин изменението на контактните условия води до локална промяна на механичната връзка между съседните части на арката.

Появата на пасивен шарнир променя първоначалната статическа схема на конструкцията. Безшарнирната арка представлява статически неопределима система, при която разпределението на вътрешните усилия зависи както от условията на равновесие, така и от деформационните характеристики на конструкцията и граничните условия. Формирането на пасивни шарнири последователно редуцира степента на статическа неопределимост и създава възможност за локална ротация в зоните на декомпресия.

Този процес е съпроводен с преразпределение на вътрешните усилия. След възникването на пасивен шарнир първоначалното разпределение на огъващите моменти се изменя, а линията на натиск приема нова траектория, съответстваща на променените контактни условия и статическата схема на конструкцията. Следователно последващото механично поведение на арката се определя от равновесието на вече адаптираната система, а не единствено от нейното първоначално напрегнато състояние.

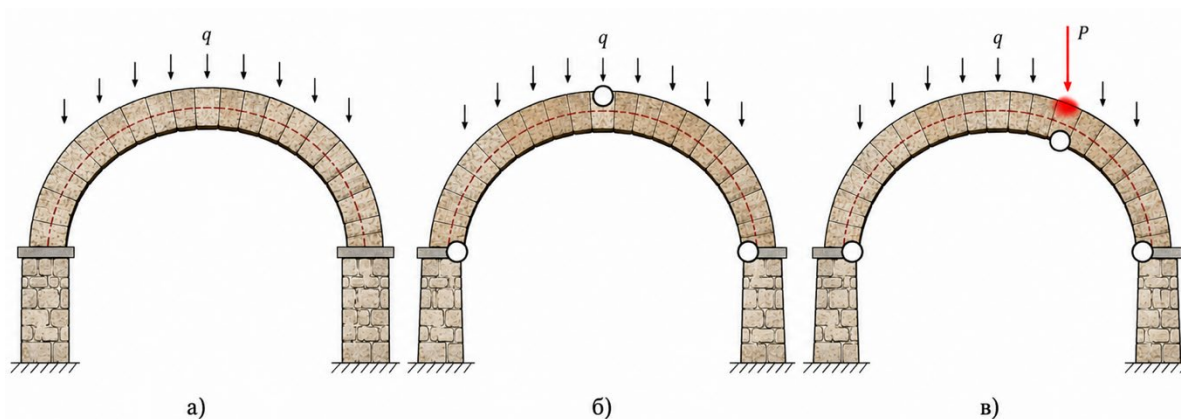
От тази гледна точка формирането на пасивни шарнири може да се разглежда като последователен процес на статическа адаптация. Всяка локална промяна на контактните условия изменя начина на пренасяне на натоварването и предизвиква ново преразпределение на вътрешните усилия. Арковата система може да премине през последователни равновесни състояния, характеризиращи се с различна степен на статическа неопределимост и различна траектория на линията на натиск.

При последователното формиране на пасивни шарнири първоначалната безшарнирна арка постепенно изменя своята механична схема. Особен интерес представлява състоянието след формирането на три пасивни шарнира, при което първоначалната статически неопределима система може да бъде представена чрез статически определима тришарнирна схема. При наличие на геометрично допустима линия на натиск в границите на активната натисната зона тази схема може да съответства на ново равновесно състояние на арковата конструкция.

При идеализирани условия на симетрична геометрия, еднородни механични характеристики на зидарията, симетрично натоварване и неизменни опорни условия формирането на пасивните шарнири следва симетричния характер на напрегнатото състояние. В такъв идеализиран модел третият пасивен шарнир може да се формира в зоната на ключа на арката, поради което именно това положение традиционно се използва при представянето на тришарнирната аркова схема. Реалните зидани конструкции обаче практически никога не отговарят напълно на тези идеализирани предпоставки. Нееднородността на зидарията и разтвора, нарушените или частично отворени фуги, локалните геометрични отклонения, неравномерните слягания и локалните несиметрични натоварвания изменят разпределението на вътрешните усилия и траекторията на линията на натиск. Поради това третият пасивен шарнир може да се формира извън ключа — в локална зона, в която декомпресията прогресира и контактът във фугата се редуцира до ръбов контакт. Следователно действителното положение на пасивния шарнир се определя от конкретното механично и контактно състояние на арката, а не единствено от нейната идеализирана геометрия.

На фиг. 2б е представен идеализираният симетричен случай с трети пасивен шарнир в зоната на ключа; при реални конструкции неговото положение може да се отклонява в зависимост от локалните условия на работа.

Следователно появата на пасивни шарнири не следва автоматично да се отъждествява със загуба на носимоспособност. До формирането на геометрично неизменяема тришарнирна схема процесът може да бъде разглеждан като механична адаптация на арката към изменените контактни и гранични условия. Механичните особености на това адаптирано равновесно състояние са разгледани в следващия раздел.



Фиг. 2. Идеализирана промяна на статическата схема на зиданата арка при формиране на пасивни шарнири: а) начална безшарнирна система; б) адаптирана тришарнирна равновесна схема при идеализирани симетрични условия; в) адаптирана тришарнирна равновесна схема при локално претоварване.

4. Тришарнирната арка като адаптирана равновесна схема

Формирането на три пасивни шарнира води до съществено изменение на механичната схема на зиданата арка [2],[3]. Първоначалната статически неопределима система може да бъде представена чрез статически определима тришарнирна схема, при която условията на равновесие са достатъчни за определяне на опорните реакции и вътрешните усилия. Тази идеализация позволява механичното поведение на адаптираната конструкция да бъде разглеждано независимо от първоначалното разпределение на огъващите моменти в безшарнирната арка.

От гледна точка на строителната механика тришарнирната арка представлява геометрично неизменяема и статически определима система. Наличието на локално отворени фуги не означава непременно загуба на способността за предаване на натоварването. В зоните на пасивните шарнири натисковото усилие продължава да се предава през локализираната контактна зона, докато възможността за предаване на огъващ момент е силно ограничена. По този начин отделните участъци на арката запазват способността си да участват в общото равновесие на системата.

Основно условие за съществуването на подобно адаптирано равновесно състояние е наличието на геометрично допустима линия на натиск, преминаваща в границите на активната натисната зона на арковия пръстен [5]. Положението на линията на натиск вече съответства на променената шарнирна схема и на действителните контактни условия във фугите. Следователно тя не трябва да се разглежда като продължение на първоначалната

траектория, характерна за безшарнирната арка, а като линия на натиск, удовлетворяваща равновесието на адаптираната система.

Както е показано на фиг. 2, конкретното положение на третия пасивен шарнир зависи от действителното механично и контактнo състояние на арката. Независимо от неговото положение, определящо за съществуването на адаптираното равновесно състояние е възможността за формиране на геометрично допустима линия на натиск, съответстваща на изменената шарнирна схема.

Това обстоятелство има съществено значение при оценката на съществуващи зидани арки. Наблюдаваната пукнатина или отворена фуга не трябва да се разглежда изолирано, а като част от общото механично състояние на конструкцията. Необходимо е да се отчита положението ѝ спрямо останалите зони на декомпресия, действащите натоварвания и възможната траектория на линията на натиск. Само по този начин може да се оцени дали формираната шарнирна конфигурация съответства на допустимо адаптирано равновесно състояние.

По този начин тришарнирната схема може да се разглежда като **идеализиран механичен модел на адаптирано равновесие на зиданата арка след развитие на локална декомпресия и пасивни шарнири**. Тя не означава възстановяване на първоначалното състояние на конструкцията, а преминаване към различен начин на пренасяне на натоварването, определен от новите контактни условия и преразпределението на вътрешните усилия.

5. Граници на адаптацията и предпоставки за критично развитие

Преминаването на зиданата арка към адаптирана тришарнирна схема не възстановява първоначалното ѝ механично състояние. Формираните зони на декомпресия и пасивните шарнири променят контактната структура на зидарията и водят до ново разпределение на вътрешните усилия. При непроменени натоварвания и гранични условия арката може да запази равновесието си, но локални въздействия като несиметрично натоварване, неравномерни слягания, повреди във фугите или разрушаване на отделни зидани единици могат да изменят положението на линията на натиск и да предизвикат нов процес на декомпресия.

Следователно границата на адаптационната способност не се определя единствено от наличието на пукнатини или отворени фуги, а от съвместното действие на геометрията на арката, положението на линията на натиск и развитието на контактното състояние в отделните сечения. Това налага оценката на съществуващите зидани арки да се основава

не само на наблюдаваните повреди, но и на анализа на зоните, в които при допълнителни локални въздействия е възможно достигането на ново гранично контактено състояние и формирането на четвърти пасивен шарнир.

6. Научна хипотеза

Въз основа на анализа на процесите на декомпресия и изменението на контактните условия в масивните зидани арки се формулира следната научна хипотеза:

„Появата на локални зони на декомпресия и формирането на ограничен брой пасивни шарнири в зиданите арки не означават непременно загуба на носимоспособност, а могат да съпътстват прехода на конструкцията към изменено равновесно състояние при промяна на натоварванията, граничните условия и контактното взаимодействие между отделните части на зидарията.

При последователното преразпределение на вътрешните усилия първоначално статически неопределимата арка може да премине към идеализирана тришарнирна равновесна схема. Запазването на равновесието в това състояние е възможно, ако съществува геометрично допустима линия на натиск, която преминава през активните контактни зони и остава в границите на арковия пръстен.

Положението на пасивните шарнири не е предварително зададено, а се определя от геометрията, натоварването и действителното механично и контактено състояние на конструкцията. Локалните несъвършенства, повредите, неравномерните слягания и несиметричните въздействия могат да изменят зоните на тяхното формиране.“

7. Механична обосновка на научната хипотеза

Предложената научна хипотеза се основава на класическите предпоставки на теорията на зиданите конструкции, според които зидарията работи основно на натиск, не поема опън, а контактното взаимодействие между отделните зидани елементи се осъществява чрез натисковите зони. Приема се, че не настъпва приплъзване между съседните блокове и че геометрията на арката позволява формирането на равновесна линия на натиск в границите на арковия пръстен.

При тези предпоставки промяната на външното натоварване, граничните условия или локалното състояние на зидарията води до изменение на вътрешните усилия и до преместване на натисковата резуланта в отделните сечения. Последователността на тези процеси определя механизма на декомпресия, формирането на пасивни шарнири и възможността за достигане на ново равновесно състояние.

7.1. Възникване на декомпресия

В процеса на натоварване положението на натисковата резултанта във всяко напречно сечение на арката се определя от съвместното действие на нормалната сила N и огъващия момент M . Положението на резултантата спрямо центъра на сечението се характеризира чрез ексцентрицитета

$$e = \frac{M}{N},$$

който определя разпределението на нормалните напрежения в контактната фуга между съседните зидани елементи.

Когато натисковата резултанта се намира в границите на ядрото на правоъгълното сечение

$$|e| \leq \frac{h}{6},$$

цялото сечение остава под натиск и контактът между отделните зидани елементи е пълен. При увеличаване на ексцентрицитета извън границите на ядрото в част от контактната фуга биха възникнали опънни напрежения. Тъй като зидарията практически не поема опън, тази част от контактната повърхност се разтоварва и престава да участва в предаването на нормалното усилие. В резултат настъпва локална декомпресия, а натисковото усилие се концентрира в намаляваща активна контактна зона.

При правоъгълно сечение и линейно разпределение на натисковите напрежения височината на активната контактна зона може да бъде определена чрез зависимостта

$$c = 3 \left(\frac{h}{2} - |e| \right),$$

валидна за

$$\frac{h}{6} < |e| < \frac{h}{2}.$$

От тази зависимост следва, че с увеличаване на ексцентрицитета активната контактна зона намалява постепенно, без да изчезва моментално. Следователно между състоянието на пълен контакт и граничния ръбов контакт съществува област на частично декомпресирано, но все още равновесно сечение.

Следователно локалната декомпресия не представлява непосредствена загуба на носимоспособност, а естествен етап от изменението на контактните условия, при който натисковото усилие продължава да се предава през оставащата активна контактна зона.

7.2. Формиране на пасивен шарнир

При по-нататъшно увеличаване на ексцентрицитета натисковата резултанта постепенно се приближава към вътрешния или външния ръб на контактната фуга. Активната контактна зона продължава да намалява, докато в граничното състояние контактът се локализира в непосредствена близост до единия ръб на сечението.

При това състояние ексцентрицитетът достига граничната стойност

$$|e| \rightarrow \frac{h}{2},$$

при която натисковата резултанта практически преминава през ръба на контактната зона. В резултат между съседните участъци на арката възниква възможност за относително завъртане около тази точка, без отделяне на натисковия контакт. В механичния модел това гранично контактно състояние се идеализира като **пасивен шарнир**.

Следва да се подчертае, че пасивният шарнир не представлява предварително съществуваща конструктивна връзка, а възниква естествено вследствие на изменението на контактните условия в зидарията. Той не се въвежда предварително в изчислителния модел, а е резултат от постепенното преразпределение на вътрешните усилия и локалната декомпресия.

Необходимо е също да се направи разграничение между геометричния център на сечението и точката на контакт. Огъващият момент спрямо центъра на сечението не е нулев, тъй като

$$M = N e.$$

Нулев е единствено моментът на натисковата резултанта спрямо точката, около която се осъществява относителното завъртане. Именно тази точка се приема за център на пасивния шарнир в идеализирания механичен модел.

Следователно пасивният шарнир представлява гранично контактно състояние, при което част от контактната повърхност е декомпресирана, а оставащата активна зона продължава да предава натисковото усилие. Появата му сама по себе си не означава

загуба на устойчивост, а създава възможност за последващо преразпределение на вътрешните усилия в конструкцията.

7.3. Преразпределение на вътрешните усилия и възможност за ново равновесно състояние

Формирането на пасивен шарнир изменя контактните условия в съответното сечение, но не води автоматично до загуба на общото равновесие на арката. След появата му вътрешните усилия се преразпределят между съседните участъци на конструкцията, а положението на линията на натиск се изменя в съответствие с новите контактни условия.

С увеличаване на броя на пасивните шарнири степента на статическата неопределимост на арката постепенно намалява. Ако след формирането на три пасивни шарнира е възможно изграждането на геометрично допустима линия на натиск, разположена в границите на арковия пръстен, конструкцията **може** да достигне ново равновесно състояние, което в механичния модел се идеализира като тришарнирна статически определима система.

В това състояние равновесието на отделните участъци се описва чрез класическите уравнения на статиката

$$\sum X = 0, \quad \sum Y = 0, \quad \sum M = 0.$$

Самото наличие на три пасивни шарнира обаче не е достатъчно условие за запазване на носимоспособността. Необходимо е линията на натиск да преминава през активните контактни зони в шарнирите и да остава в границите на арковия пръстен между тях. Само при изпълнение на тези условия конструкцията може да продължи да пренася външното натоварване в новата си равновесна конфигурация.

Следователно образуването на три пасивни шарнира не следва да се разглежда като непосредствен механизъм на разрушение. То представлява **механично възможен преход** от първоначално статически неопределима към статически определима равновесна схема, чиято реализация зависи от конкретното натоварване, геометрията и действителното контактно състояние на конструкцията.

7.4. Влияние на локалните нарушения върху положението на пасивните шарнири

Положението на пасивните шарнири не се определя предварително от геометрията на арката, а се формира в резултат от действителното разпределение на вътрешните усилия и контактните условия в отделните сечения. При симетрично натоварване и еднородна геометрия зоните на максимален ексцентрицитет могат да бъдат предварително оценени. При реалните исторически конструкции обаче механичното поведение обикновено се влияе от редица локални фактори.

Такива фактори са неравномерните слягания на опорите, локалните повреди на зидарията, нарушените фуги, измененията в дебелината на арковия пръстен, допълнителните локални натоварвания и други конструктивни несъвършенства. Вследствие на тях вътрешните усилия се преразпределят, изменя се положението на линията на натиск и зоната на максимален ексцентрицитет може да се премести в различно сечение.

Поради това третият пасивен шарнир не следва да се разглежда като геометрично фиксирана точка, например в ключа на арката, а като резултат от конкретното механично състояние на конструкцията. Неговото положение зависи от съвместното действие на геометрията, натоварването и контактното взаимодействие между отделните зидани елементи.

Следователно положението на пасивните шарнири представлява следствие от действителното разпределение на вътрешните усилия, а не предварително зададена характеристика на арковата система.

7.5. Извод от механичната обосновка

Проведената механична обосновка показва, че процесите на декомпресия, постепенното намаляване на активната контактна зона и формирането на пасивни шарнири представляват взаимосвързани етапи от механичното поведение на зиданата арка. При спазване на класическите предпоставки за работа на зидарията на натиск тези процеси не водят непременно до непосредствена загуба на носимоспособност, а могат да бъдат съпроводени с преразпределение на вътрешните усилия и достигане на ново равновесно състояние.

Извършеният анализ показва също, че възможността за преминаване към идеализирана тришарнирна равновесна схема зависи от съществуването на геометрично допустима линия на натиск, разположена в границите на арковия пръстен. Положението на пасивните шарнири не е предварително определено, а се формира в зависимост от

действителното разпределение на вътрешните усилия, геометрията, натоварването и локалното контактно състояние на конструкцията.

Следователно предложената научна хипотеза е **механично обоснована** в рамките на приетия идеализиран модел на зидария без опън. Окончателната ѝ оценка следва да се извърши чрез анализ на реални исторически конструкции, при които може да се провери съответствието между предвидените и действително наблюдаваните механизми на поведение.

8. Верификация на научната хипотеза чрез анализ на реални конструкции

За проверка на предложената научна хипотеза са анализирани реални исторически зидани арки, при които са документирани локални зони на декомпресия, пукнатини и формиране на пасивни шарнири. Разгледаните примери показват, че образуването на ограничен брой пасивни шарнири не води непосредствено до загуба на носимоспособност. В повечето случаи конструкцията продължава да функционира, като вътрешните усилия се преразпределят и се достига ново равновесно състояние.

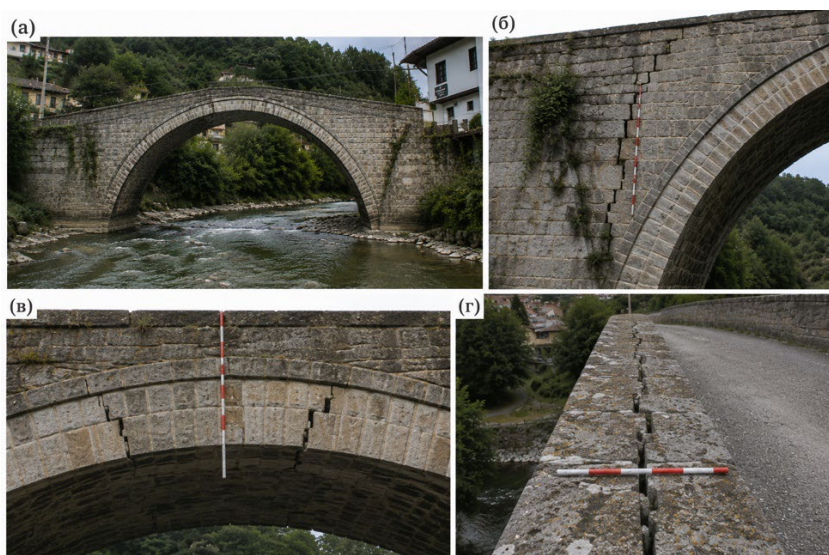
Анализът на разгледаните конструкции показва също, че положението на пасивните шарнири не е предварително определено, а зависи от геометрията на арката, действителното натоварване, локалните повреди и контактното състояние на зидарията. Това съответства на механичния модел, разработен в настоящото изследване.

Следователно наблюдаваното поведение на анализирани конструкции е в съгласие с формулираната научна хипотеза и потвърждава нейната приложимост при интерпретирането на механичното поведение на исторически зидани арки.

8.1. Историческият каменен мост в Иваница (Сърбия)

Историческият каменен мост в Иваница (фиг.3) представлява едноотворна зидана арка, изградена в периода 1904–1906 [8]. Мостът е предмет на подробно конструктивно обследване, включващо геодезични измервания, визуална инспекция, лабораторни изпитвания и числено моделиране с цел установяване на причините за наблюдаваните повреди.

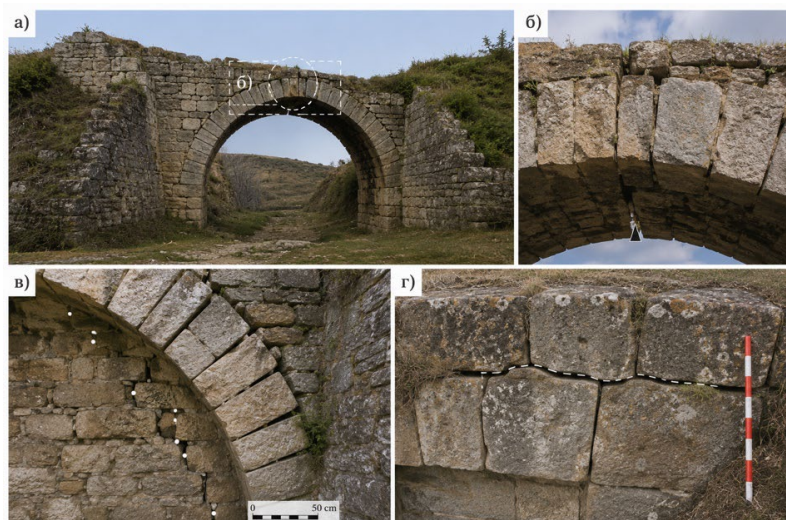
При обследването са установени надлъжни пукнатини в арковия пръстен и зоните над него, без непосредствена загуба на общата устойчивост на конструкцията. Анализът показва, че наблюдаваните повреди са резултат от съвместното действие на няколко деградационни процеса, а не представляват непосредствен механизъм на разрушение. Авторите отбелязват, че наличието на подобни пукнатини само по себе си не означава неизбежен отказ на конструкцията и изисква оценка на действителното ѝ механично поведение.



Фиг. 3 Историческият каменен мост в Иваница, Сърбия: **(а)** общ изглед на едноотворната зидана арка; **(б)** вертикални пукнатини в зоната над арката; **(в)** пукнатини в арковия пръстен; **(г)** надлъжни пукнатини по пътното платно

Наблюдаваното състояние на моста е в съответствие с предложения в настоящото изследване механичен модел. Формирането на локални зони на декомпресия и пукнатинообразуване не е съпроводено с непосредствена загуба на носимоспособност, което подкрепя хипотезата, че ограничен брой пасивни шарнири могат да бъдат част от процеса на преразпределение на вътрешните усилия и достигане на ново равновесно състояние.

8.2. Историческият мост Bothwell Castle (Шотландия)



Фиг. 4 Документирани повреди при зиданата арка на **Bothwell Castle**: **(а)** общ изглед на арката; **(б)** отваряне на фугите и локална декомпресия в областта на ключа; **(в)** разместване на клиновидните камъни и развитие на пукнатини в арковия пръстен; **(г)** хоризонтални пукнатини в надзидката, свързани с преразпределение на вътрешните усилия

Изследванията на историческия мост при Bothwell Castle (фиг.4) показват, че диференциалните слягания предизвикват изменение на линията на натиск и образуване на локални пукнатини в арковия пръстен [9], [10]. Въпреки настъпилите повреди конструкцията не губи непосредствено своята носимоспособност, а достига ново равновесно състояние чрез преразпределение на вътрешните усилия. Анализът потвърждава, че положението на пасивните шарнири се определя от действителното механично състояние на арката, а не от предварително зададени геометрични положения, което е в съответствие с предложената научна хипотеза.

Заклучение

Изследването показва, че механичното поведение на зиданите арки може да бъде обяснено чрез последователното развитие на декомпресия, формиране на пасивни шарнири и преразпределение на вътрешните усилия. Предложената хипотеза приема, че при образуване на три пасивни шарнира арката може да достигне ново равновесно състояние, а появата на четвърти шарнир е свързана с локални нарушения в конструкцията, като неравномерни слягания, локални повреди или извънредни натоварвания.

Анализът на реални исторически зидани мостове показва, че локалните пукнатини и зоните на декомпресия не водят непременно до непосредствена загуба на носимоспособност, а често представляват етап от адаптацията на конструкцията към изменените условия на работа. Получените резултати потвърждават приложимостта на предложения механичен модел и създават основа за по-надеждна оценка на техническото състояние и за избор на адекватни мерки за укрепване и опазване на историческите зидани конструкции.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Heyman J., The Stone Skeleton. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 2, No. 2, 1966, pp. 249–279. DOI: 10.1016/0020-7683(66)90018-7;
2. Heyman J., *The Masonry Arch*. Ellis Horwood, Chichester, 1982;
3. Drucker D. C., Prager W., Greenberg H. J., Extended Limit Design Theorems for Continuous Media, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 9, No. 4, 1952, pp. 381–389. DOI: 10.1090/qam/45573;

4. EN 1996-1-1:2022. *Eurocode 6 — Design of Masonry Structures — Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures*;
5. Como M., *Statics of Historic Masonry Constructions*. Springer Series in Solid and Structural Mechanics, Springer International Publishing;
6. Angelillo M., *Mechanics of Masonry Structures*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, Vol. 551, Springer, Vienna, 2014;
7. Gilbert M., Limit Analysis Applied to Masonry Arch Bridges: State-of-the-Art and Recent Developments. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Arch Bridges (ARCH'07)*, Madeira, Portugal, 2007;
8. Sokolović, N.M., Petrović, M., Kontić, A., Koprivica, S., Šekularac, N. *Inspection and Assessment of Masonry Arch Bridges: Ivanjica Case Study*. Sustainability, 2021, **13**(23), 13363. <https://doi.org/10.3390/su132313363>;
9. Historic Environment Scotland. *Bothwell Castle*. Официална документация за историята, състоянието и консервацията на замъка;
10. McCarter, W. J., et al. *Optimizing strengthening interventions on historic masonry walls: an experimental study*. Structural Integrity Procedia, 2019. Статията съдържа снимки на разрушения по South Curtain и Latrine Tower на Bothwell Castle.