XIV Международна научна конференция
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 10-12 септември 2026 г, Варна
XIV International Scientific Conference
„Civil Engineering Design and Construction“, Sept. 10 - 12, 2026, Varna, Bulgaria
ISSN 2683-071X (online) ISSN 2738-7879 (CD)

АНАЛИЗ НА ПРИЛОЖЕНИЯТА НА ВИСОКОЯКОСТНИ СТОМАНИ В СТРОИТЕЛСТВОТО: ПРЕДИМСТВА, ОСОБЕНОСТИ И ПРАКТИЧЕСКИ ПРИМЕРИ

Александър Младенов[1]

ANALYSIS OF THE APPLICATIONS OF HIGH-STRENGTH STEELS IN CONSTRUCTION: ADVANTAGES, FEATURES AND PRACTICAL EXAMPLES

Aleksandar Mladenov

Abstract:

The development of the steel production industry over the past few decades has made high strength steels more accessible and has led to their wider application in structural engineering. This report summarizes the advantages and rational fields of application of this category of steels, while providing a quantitative comparison with the conventional structural steels traditionally used in Bulgaria. Furthermore, the specific behavioral features of structural members and systems fabricated from high-strength steels are examined, highlighting aspects that require particular attention during the design and fabrication processes. Examples of implemented structures utilizing high-strength steels are also presented.

Keywords:
High strength steel (HSS), Advantages, Features, Practical examples

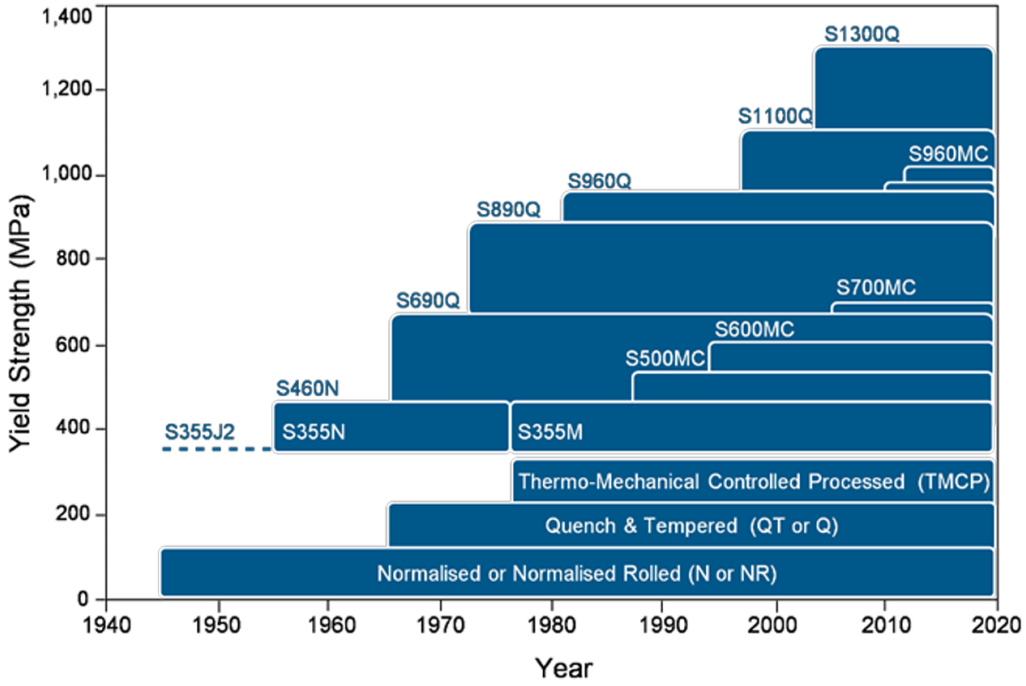
1. ВЪВЕДЕНИЕ

В исторически план развитието на строителната индустрия е било съпътствано от постепенно повишаване на механичните характеристики на строителните материали. По отношение на стоманените конструкции тази тенденция е отразена и в новото поколение Еврокодове, при които обхватът на основната част на стандарта EN 1993-1-1 е разширен до стомани с граница на провлачане до 700 MPa, като са въведени и допълнителни правила за стомани до S960. Това представлява съществено разширение спрямо действащата към момента версия, която обхваща стомани с граница на провлачане до 460 MPa и включва допълнителни ограничения за стомани до S700.

Въпреки напредъка в съвременните технологии за производство на конструкционни стомани през последните десетилетия (Фиг. 1), като термомеханичното валцуване и

[1] Александър Младенов, инж., докторант към кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, Строителен факултет, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: a.mladenov_fce@uacg.bg; Aleksandar Mladenov, Eng., PhD student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: a.mladenov_fce@uacg.bg.

закаляването с последващо отвръщане, които позволяват призводството на високоякостни стомани с необходимата ударна жилавост, пластичност и заваряемост без съществено увеличение на производствените разходи, приложението на високоякостни стомани в Европа продължава да бъде ограничено. То остава предимно в рамките на отделни специализирани инженерни проекти, като например Friends Arena (Стокхолм, Швеция) и Zandhazen railway bridge (Нидерландия).



Фигура 1. Историческо развитие на произвежданите класове конструкционни стоманени [1]

2. ОСНОВНИ ПРЕДИМСТВА И РАЦИОНАЛНИ ОБЛАСТИ НА ПРИЛОЖЕНИЕ НА ВИСОКОЯКОСТНИТЕ СТОМАНИ

2.1. Предимства

(а) Намаляване на собственото тегло на конструкцията

Приложението на високоякостни стомани води до редуциране на собственото тегло на конструкциите. При съпоставка на пазарните цени на различни класове стомана, например приблизително €750 за S355 и €950 за S690 за тон, се установява, че границата на провлачане при по-високия клас е почти два пъти по-голяма, докато увеличението в цената е около 30%. Това съотношение показва, че използването на стомани с по-висока якост има потенциал да осигури икономически ползи.

Следва обаче да се отбележи, че меродавният механизъм на разрушение при стоманените елементи в повечето случаи е загубата на устойчивост, което ограничава възможността за пълно оползотворяване на повишената якост на материала.

(б) Улесняване на производствените процеси, транспорта и монтажа на конструктивните елементи

Използването на високоякостни стомани предполага прилагането на по-тънкостенни сечения, което от своя страна води до необходимост от заваръчни шевове с по-малка дебелина. Намаленото собствено тегло на конструктивните елементи допринася за улесняване на монтажните дейности, а в случаите, при които транспортните ограничения са обусловени от масата на елементите, това може да доведе и до редуциране на транспортните разходи.

(в) Облекчаване на фундирането

Олекотяването на конструктивните елементи, в случаите когато собственото тегло представлява немалка част от общото натоварване, води до намаляване на опорните реакции в основата и създава предпоставки за икономия на материали и труд при изпълнението на фундаментната конструкция.

(г) Намаляване на височината на подовите конструкции

При едно и също външно въздействие височината на гредовите елементи може да бъде редуцирана, което е от съществено значение при проектирането на етажни сгради и представлява един от аспектите, по които стоманените конструкции традиционно отстъпват на стоманобетонните. Наред с това се създава възможност за преодоляване на по-големи разстояния между опорите, което осигурява по-голяма свобода при архитектурно-композиционното оформяне на сградата.

(д) По-ниски остатъчни напрежения

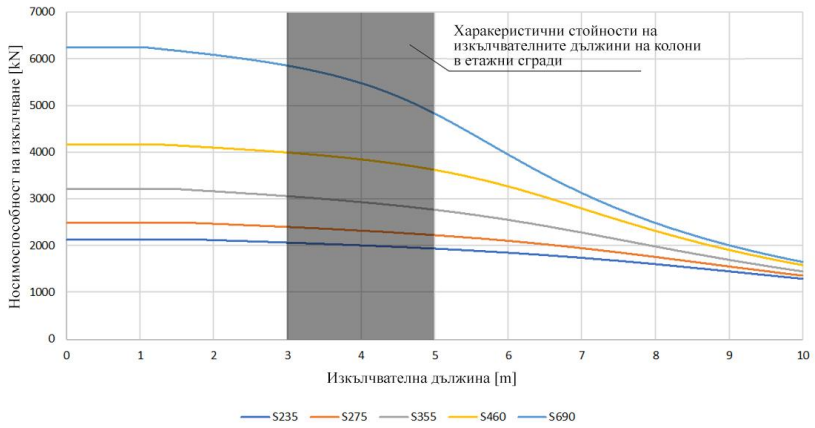
Както е известно от теорията на строителните конструкции, силата, при която даден елемент губи устойчивост, е съществено по-ниска от определената по теорията на Леонард Ойлер. Един от основните фактори, обуславящи това различие, са остатъчните напрежения σ_{res}, възникващи вследствие на термичните въздействия по време на производствените процеси.

Емпирични изследвания върху елементи от високоякостни стомани [2] – както валцувани, така и заварени – показват по-ниско съотношение между началните напрежения и границата на провлачане, а резултатите от експерименталните изпитвания [3] сочат, че дори крива на изкълчване **„a_0“** може да се окаже консервативна.

2.2. Рационални области на приложение

(а) При сгради

Използването на високоякостни стомани за определени елементи е обосновано, когато те са с ниска стройност. Като характерен пример могат да се посочат колоните в многоетажните сгради.



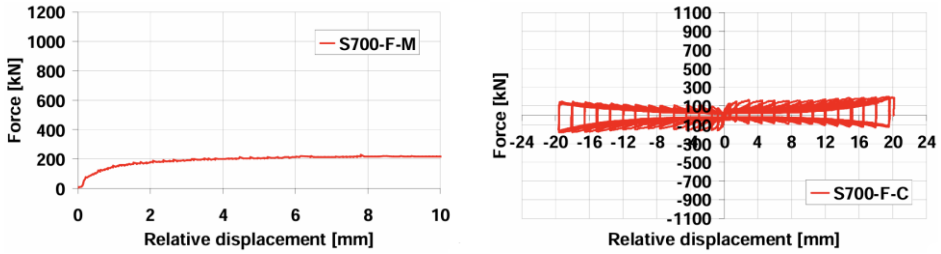
Фигура 2. Сравнение между носимоспособностите на изкълчване за различни класове стомани

Икономическа ефективност може да бъде постигната чрез прилагане на решения със затворени стоманени сечения, запълнени с бетон. По този начин, при запазване на еднакви габарити на напречното сечение, се осигурява намаляване на стройността, като стоманената обвивка същевременно ограничава напречните деформации в бетона. Допълнително предимство на подобно решение е и повишената пожароустойчивост, вследствие на високия коефициент на топлоемкост на бетонната част от сечението.

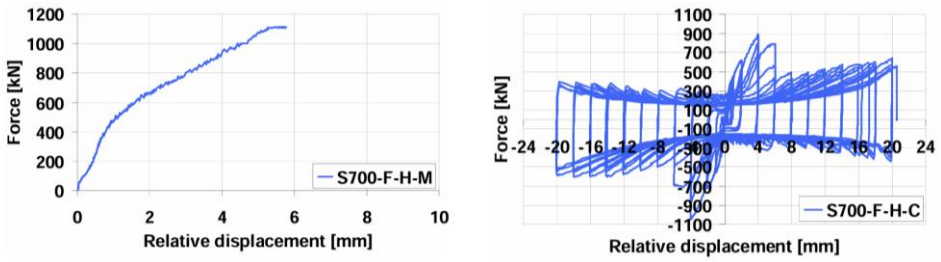
При подобно конструктивно решение особен интерес представлява осигуряването срещу надлъжно хлъзгане в зоните на предаване на усилията към колоните, по-специално във възлите греда–колона. В тази връзка, в рамките на европейския изследователски проект „High Strength Steel in Seismic Resistant Building Frames“ (HSS-SERF) [4], в университета в Тимишоара са проведени експериментални изследвания на такива възли.

При изпитванията, преди бетониране, върху стоманената колона се простелват пирони (shot fired nails), които след втвърдяване на бетона действат като дюбели. Резултатите показват, че приложението на този тип закрепващи елементи води до повишаване на носимоспособността срещу надлъжно хлъзгане в зоната на взаимодействие между стоманата и бетона.

Фигура 3. Общ вид на изпитвания образец



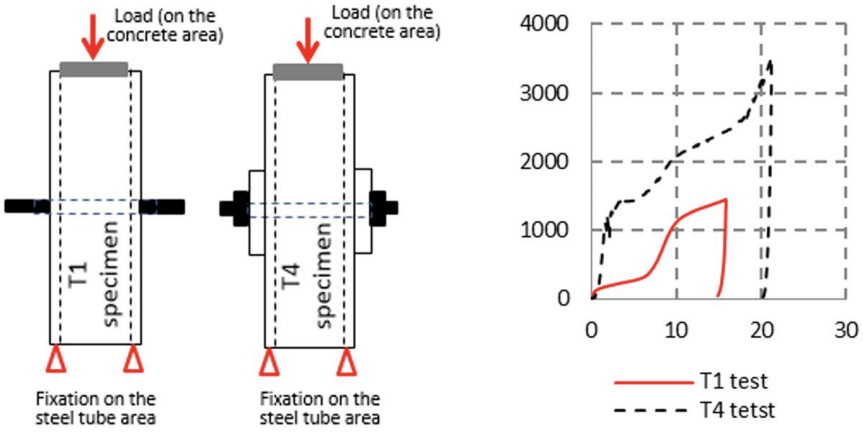
Фигура 4. Резултати от изпитването без наличие на простелни пирони



Фигура 5. Резултати от изпитването с наличие на простелни пирони

Друг изследван вариант за възела е разгледан в Университета в Лиеж, където проучванията са насочени към решение с т.нар. „дълги“ болтове. При този подход един болт преминава през цялото напречно сечение на колоната и свързва гредите, разположени от срещуположните ѝ страни. По този начин болтът изпълнява допълнителна функция – ограничава надлъжното хлъзгане.

Установено е, че ефективността на този механизъм нараства при прилагане на предварително напрягане на болта, което допринася за по-добро сцепление и по-висока носимоспособност на връзката.



Фигура 6. Експериментална постановка и резултати

Приложението на високоякостни стомани в областта на сеизмично инженерство се оценява като перспективно, но все още изисква провеждането на допълнителни изследвания и емпирични потвърждения. Към настоящия момент те намират приложение предимно в недисипативни елементи на конструктивните системи.

Особен интерес представлява използването им във външния рамков контур на дуалните системи, при които се оползотворява способността на тези елементи да работят в еластичната област при големи премествания. Това позволява съответната част от конструкцията да остане в еластичната област на работа по време на сеизмично въздействие и да изпълняват рецентрираща функция след неговото прекратяване, включително в етапа на възстановяване на конструкцията след отстраняване и подмяна на дисипативните компоненти.

(б) При мостове

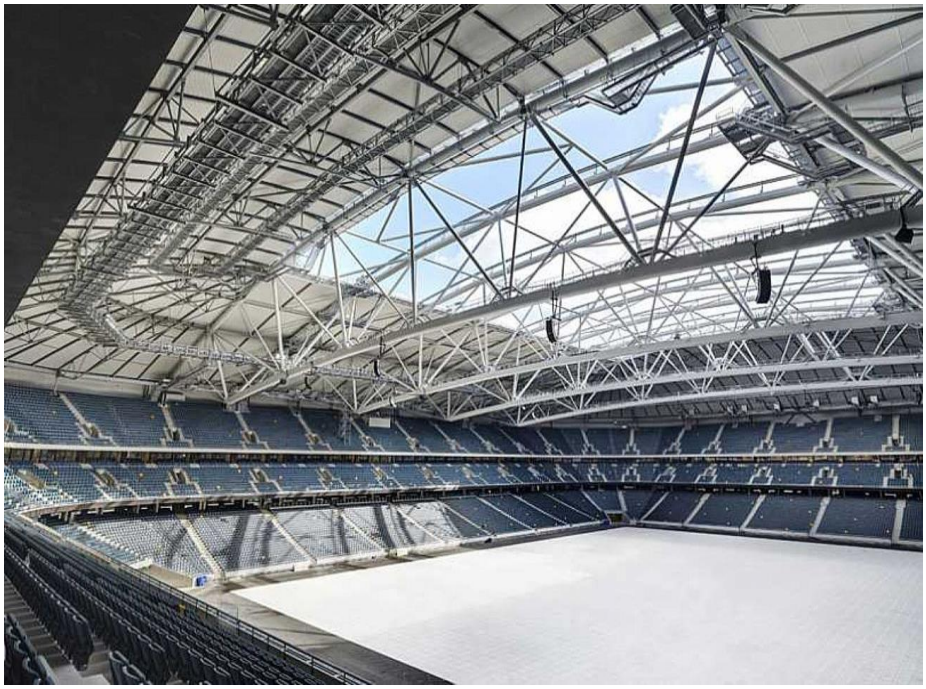
Както при сгради, така и при мостови съоръжения приложение намират решенията, при които се използват затворените сечения. Намалената дебелина на стените при тези елементи улеснява транспорта и монтажа. В тези случаи е възможно прилагането на решения, при които стоманеното сечение се запълва със бетон.

Други възможни области на приложения на високоякостните стомани могат да бъдат открити при пояси на тежко натоварени ферми, както и при комбинирани мостови греди. При последните, в зоните на отрицателни огъващи моменти, може да се търси целенасочена промяна в класа на използваната стомана (т. нар. бистоманени греди).

(в) При сгради с голям отвор

Известно е, че с увеличаване на отвора на конструкцията нараства делът от носимоспособността на елемента, който се разходва за самоносене. В този контекст, приложението на високоякостни стомани се явява целесъобразно, тъй като позволява намаляване на собственото тегло при запазване или увеличаване на носимоспособността.

Най-ефективно е приложението им при опънни елементи, какъвто е например долният пояс на ферма. При наличие на достатъчно гъсто странично укрепване обаче, тяхното приложение може да бъде разширено и до горния пояс.

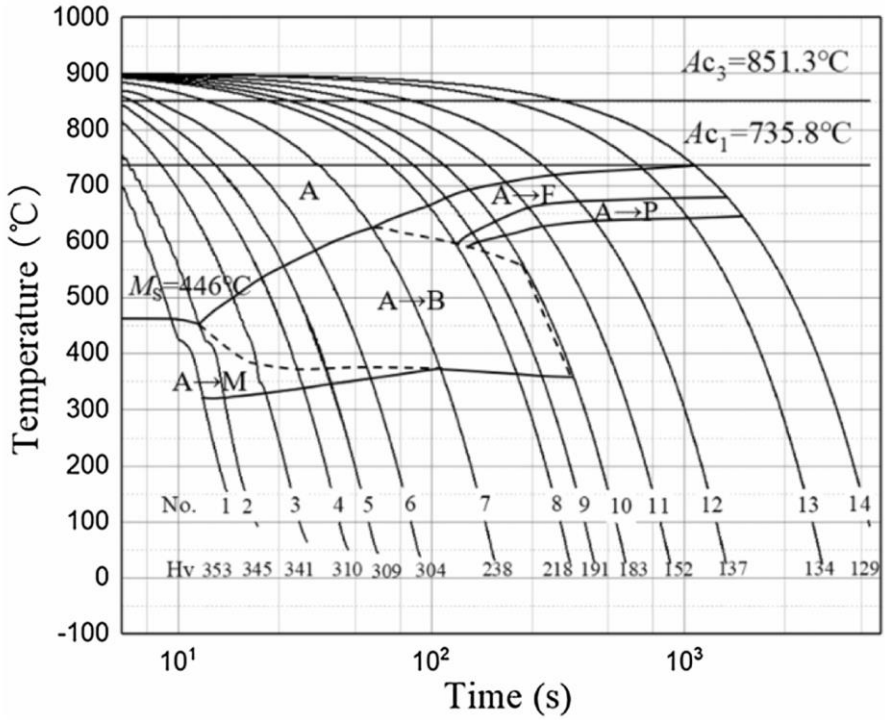


Фигура 7. Friend’s arena, Швеция [5]

3. ОСОБЕНОСТИ

3.1. Особености при заваряване

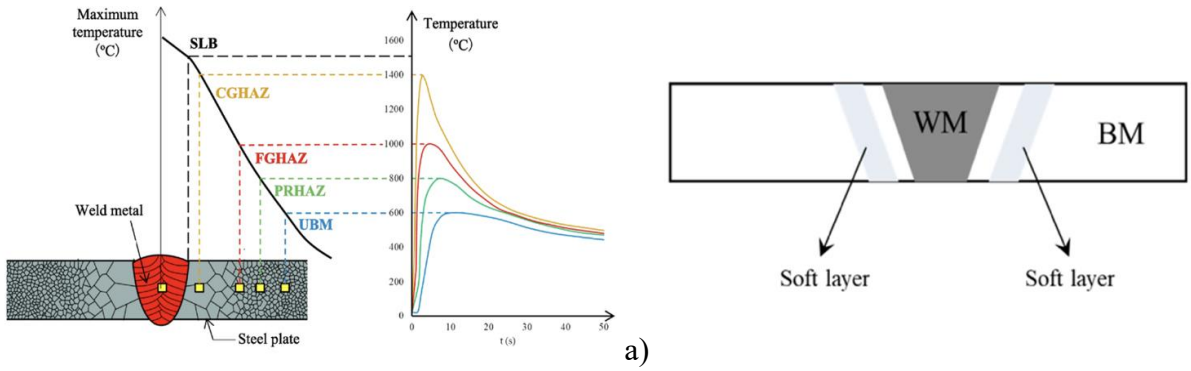
Както беше споменато, производството на високоякостни стомани се осъществява чрез два метода – закаляване с последващо отвръщане и термомеханично валцуване. Общото за двата процеса е преминаването през строго контролирани технологични етапи, при които температурата на метала и скоростта на охлаждане се поддържат в точно определени граници с цел постигане на желаните механични свойства и микроструктура.



Фигура 8. Фазови преходи в структурата на стоманата, в зависимост от скоростта на охлаждане [6]

При заваряване металът в зоната на шева се разтопява, след което при охлаждането протичат процеси на рекристализация и фазови преходи, водещи до структурни изменения. Тези изменения зависят от редица фактори, като количеството на отделената топлинна енергия, химичния състав на материала, геометрията на съединението и условията на охлаждане.

При заваряването на високоякостни стомани, в участъка с нагряване до около 1000°C и последващата я рекристализация се формира финозърнеста структура, известна като мек слой (soft layer), чиито механични характеристики са по-ниски от тези на основния метал. Установено, че широчината на този мек слой варира в граници от 0,33 до 0,6 пъти дебелината на заварявания елемент.

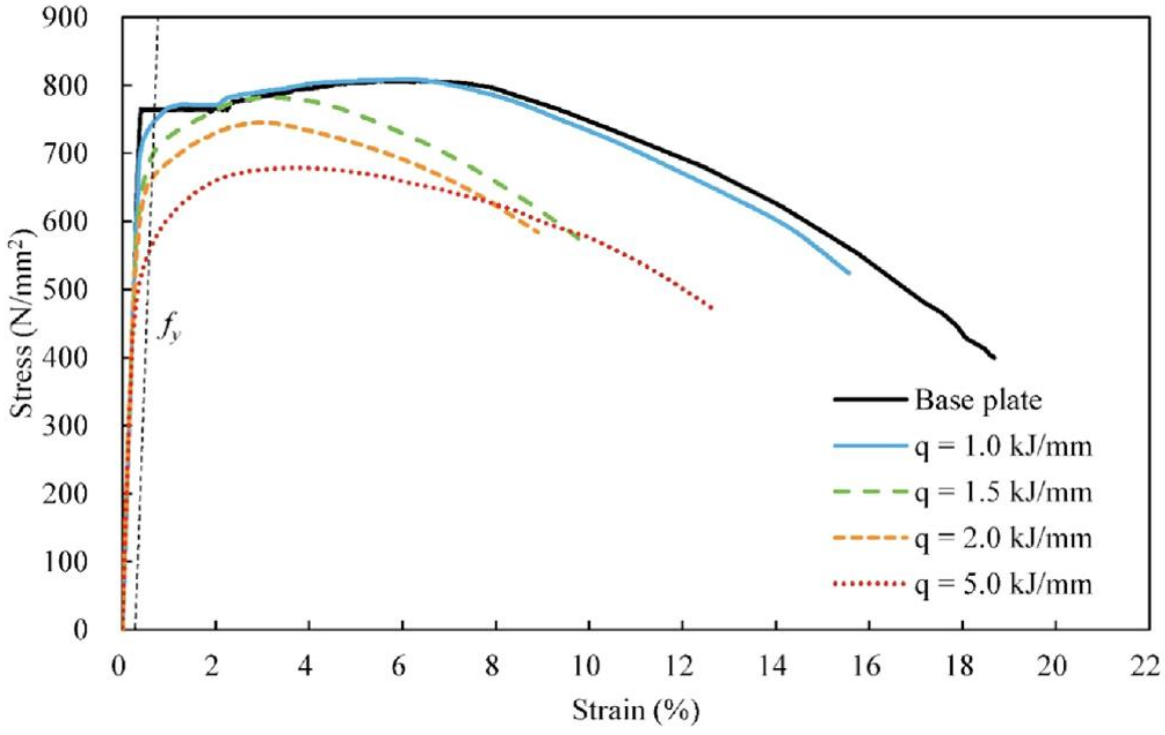


а) б)

Фигура 9. Зона на термично влияние [7] (а) различия в микроструктурата спрямо максималната температура (б) мек слой в околошевната зона

От голямо значение е количеството вложена топлинна енергия, която може да бъде оценена чрез следната зависимост:

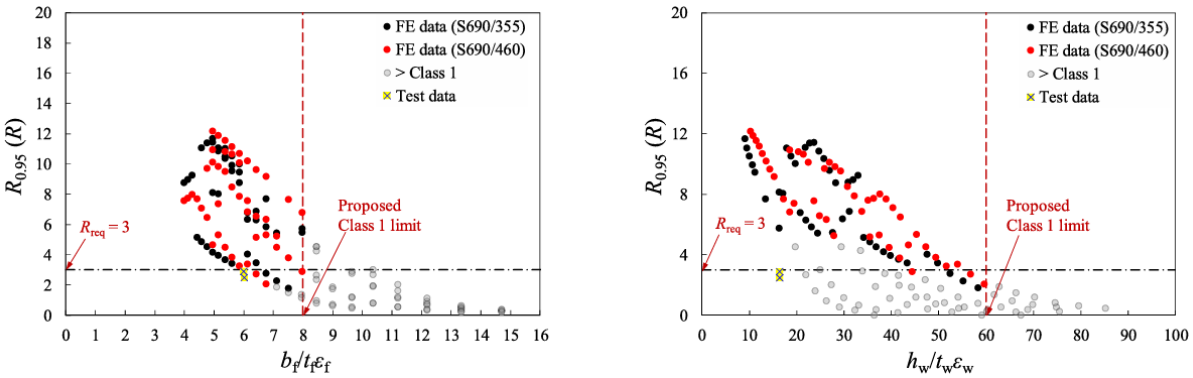
$$q = k\frac{UI}{v}\frac{60}{1000} \quad (1)$$



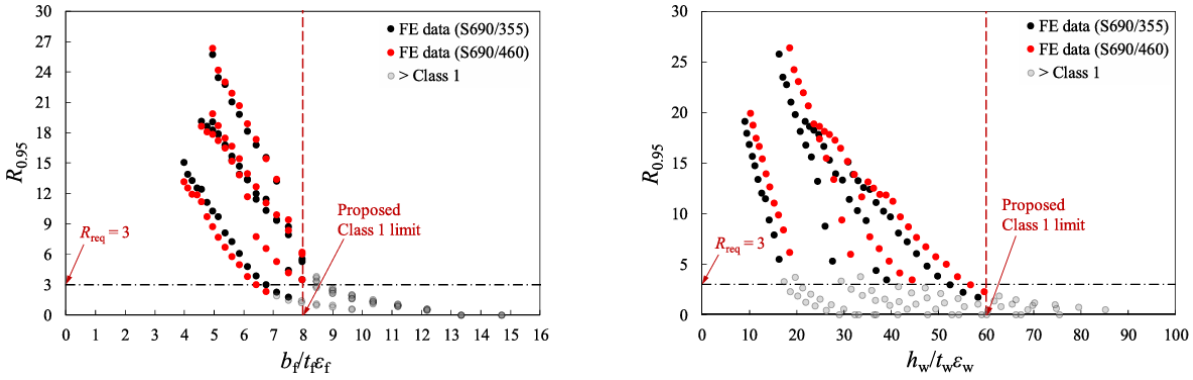
Фигура 10. Зависимости напрежение-деформации за стомана S690 при различно количество вложена топлинна енергия [7]

3.2. Класификация на напречните сечения

Известно е, че в действащата към настоящия момент версия на стандарта е въведена класификация на напречните сечения, насочена към определяне на максималната носимоспособност (в еластичен или пластичен стадий) без да се наблюдава загуба на местна устойчивост, вследствие на нормални напрежения. Експериментални и параметрични изследвания [8] за случая на триточково огъване на греди показват, че настоящите ограничения за I-сечения се оказват либерални по отношение на клас 1. С оглед осигуряване на необходимия ротационен капацитет за прилагане на метода на граничното равновесие се предлага въвеждането на по-строги ограничения, както следва: за натиснатия пояс - $b_f/t_f\varepsilon_f=8$, а за стебла при двойносиметрично сечение - $h_w/t_w\varepsilon_w=60$.



Фигура 11. Резултати от триточково огъване [8]



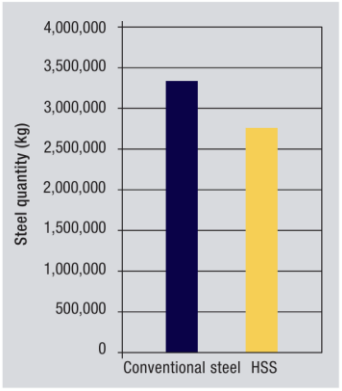
Фигура 12. Резултати от четириточково огъване [8]

4. ПРИМЕРИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЯ НА ВИСОКОЯКОСТНИ СТОМАНИ

4.1. Friends Arena, Stockholm

Носещата конструкция на подвижния покрив е изпълнена чрез четири трипоясни ферми с височина 17 m и размах 162 m. Горният пояс на фермите е изграден от кръгли кухи сечения с диаметър 1067 mm, изпълнени от стомана клас S460, докато долният пояс е реализиран като отворен U-образен профил от стомана клас S690. Крайните опънни елементи са проектирани от стомана с още по-висока якост — клас S900.

В [8] е представен анализ на икономическата ефективност от приложението на високоякостни стомани, при който е установено, че използването им води до намаление на общото количество метал с приблизително 17% в сравнение с решение, базирано на стомана клас S355, както и до редукция на стойността на конструкцията с около 14,5%.



Design option	Cost
Conventional structural steel	€ 14,309,869
High-strength steel (as-built solution)	€ 12,228,959

Фигура 13. Оценка на ползите от приложението на високоякостни стомани [9]

4.2. Рецентрираща функция при дуални системи

В съвременната строително-инженерна практика осигуряването на сградите срещу сеизмични въздействия представлява въпрос, на който се отделя съществено внимание. Въпреки това, проблемът, свързан с възстановяването на експлоатационната годност на сградите след настъпване на значителни повреди, все още не е достатъчно изяснен.

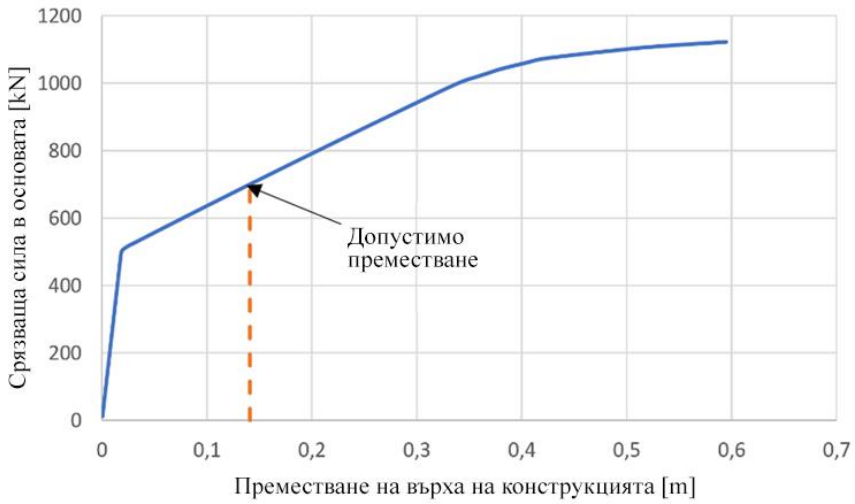
Едно обещаващо решение в тази насока е прилагането на дуални конструктивни системи, при които коравият рамков контур се изпълнява от елементи, изработени от високоякостни стомани. Подобен подход позволява рамковата система не само да изпълнява ролята на втора линия на защита, но и да се използва нейният по-голям деформационен капацитет в еластичната област. Това създава възможност за възстановяване на вертикалността на конструкцията след отстраняване на дисипативните елементи, в които са се натрупали пластични деформации.

С цел онагледяване на този ефект е разработен изчислителен модел на триотворна рамка с корави възли, като в средния отвор са предвидени нецентрично включени диагонали. Проведен е нелинеен статичен анализ, чрез който е установена зависимостта между срязващата сила в основата и хоризонталното преместване на върха на конструкцията. В последващ етап е реализиран нелинеен анализ при отчитане на следната последователност от етапи:

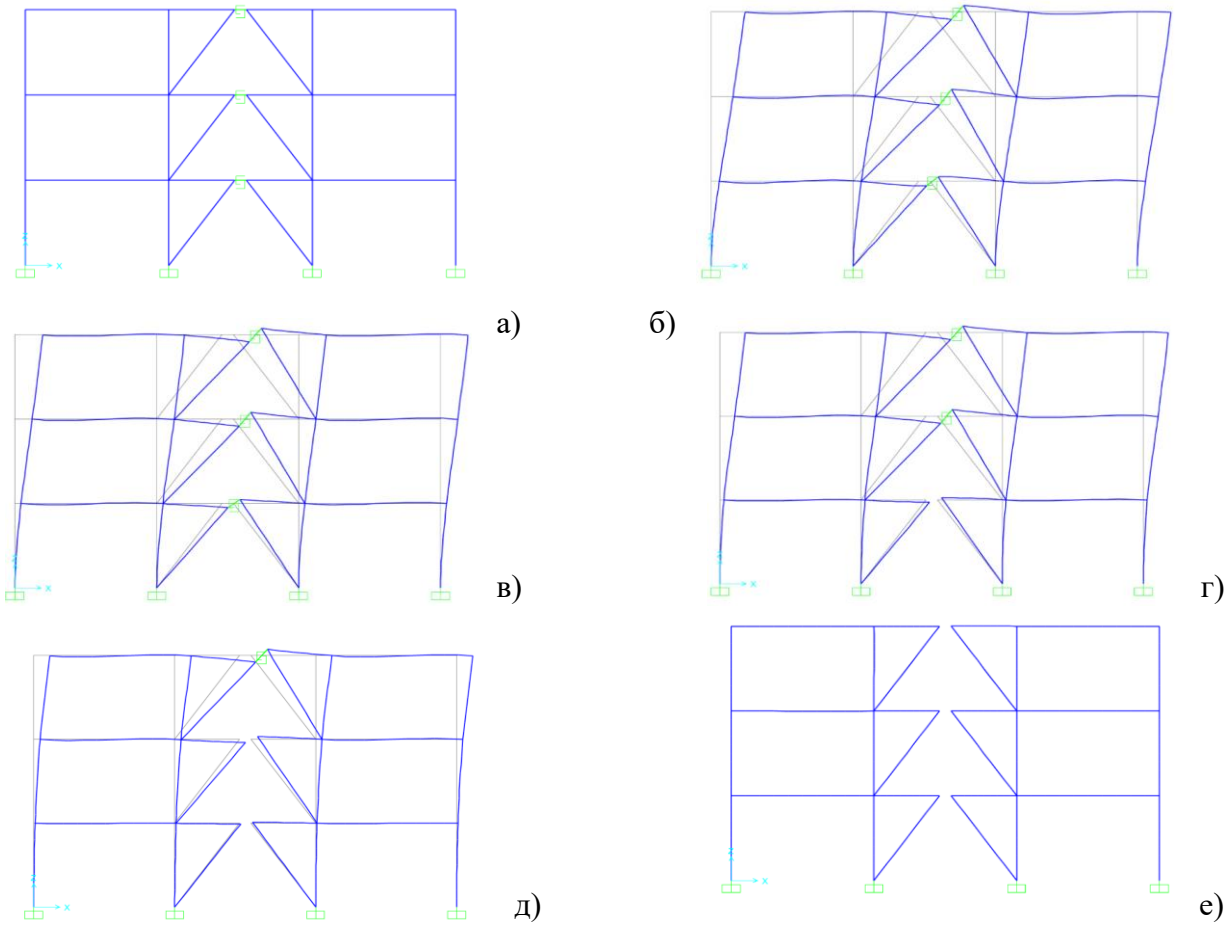
1) Натоварване с хоризонтални сили до достигане на максимално допустимата деформация за състояние на значителни повреди, съгласно FEMA 356 [10];

2) Разтоварване на модела;

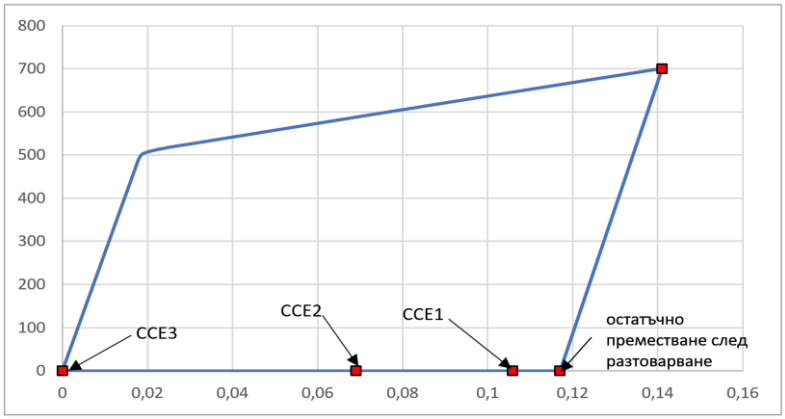
3) Премахване на пластифицираните сеизмични свързващи елементи (ССЕ).



Фигура 14. Капацитивна крива



Фигура 15. Деформирана схема: преди прилагане на натоварването (а) в края на нелинейния статичен анализ (б) след премахване на хоризонталното натоварване (в) след премахване на първия ССЕ (г) след премахване на втория ССЕ (д) след премахване на третия ССЕ (е)



Фигура 16. Премествания на върха на конструкцията при премахване на ССЕ

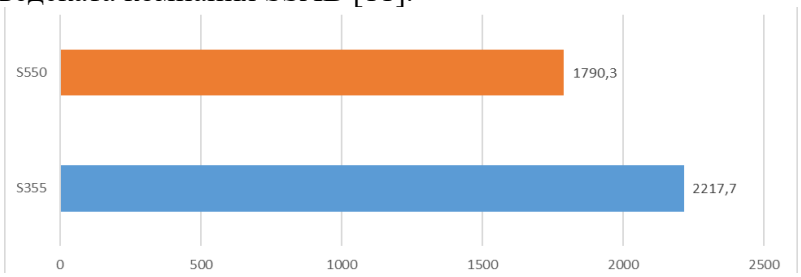
4.3. Приложение за покривни ферми

Основните области на приложение на високоякостните стомани са елементи с ниска стройност или такива, работещи на опън. Типичен пример са прътите от покривните ферми, при които доминиращи са гравитационните натоварвания.

С цел съпоставка на необходимото количество вложена стомана е извършено оразмеряване на две покривни ферми, натоварени с вертикални товари. Фермите са с

идентична геометрия, като дължината и широчината на обслужваната товарна ивица са съответно 30 m и 6 m.

За целите на оразмеряването е използван оптимизационен уеб-базиран софтуер, разработен от шведската компания SSAB [11].



Фигура 17. Крайна стойност на масата на фермите [kg] въз основа на проведения анализ.

5. ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

Постигането на високи темпове на растеж на съвременната строителна индустрия предполага употребата на все по-малко количество строителни материали, за сметка на тяхното качество. Темпът на внедряване на високоякостните стомани в европейската строителна практика, и в частност в България, не съответства на темпа на нарастване на производствените възможности. В този контекст възниква необходимост от задълбочена оценка на потенциалните области на приложение, както и на поведението на конструкции и конструктивни части с приложения на високоякостни стомани.

ЛИТЕРАТУРА

[1] High Strength Steel Design and Execution Guide (P432), SCI 2020, SCI, 178 p.
[2] Chen S., Liu J., Chan T. M., Material properties and residual stresses of welded high strength steel and hybrid I-sections, Engineering Structures, 276, 2023.
[3] Tankova T., Rodrigues F., Leitão C., Martins C., Silva L. Simões, Lateral-torsional buckling of high strength steel beams: Experimental resistance, Thin-Walled Structures, 164, 2021.
[4] Dubina, D. et al. High strength steel in seismic resistant building frames (HSS-SERF): Final report. European Commision, 2015, 186 p.
[5] C.F. Møller Architects. *Official website*. Достъпно на: https://www.cfmoller.com (посетен на 4 май 2026 г.).
[6] Chung K. F., Ho F. C., Hu Y., Wang K., Liu X., Xiao M., Nethercot D., Experimental evidence on structural adequacy of high strength S690 steel welded joints with different heat input energy, Engineering Structures, 204, 2020.
[7] Liu X., Chung K. F., Ho H. C., Xiao M., Hou Z. X., Nethercot D., Mechanical behavior of high strength S690-QT steel welded sections with various heat input energy, Engineering Structures, 175, 2018, 245 - 256.
[8] Yun X., Zhu Y., Gardner, L., Experimental investigation of steel frames made of hybrid steel welded I-sections, Ernst & Sohn, ce/papers, vol. 6, 3-4: Eurosteel 2023, https://doi.org/10.1002/cepa.2518.
[9] Molybdenum in Architecture, Building and Construction: Friends Arena, Stockholm, IMOA, 2013.
[10] Federal Emergency Management Agency (FEMA), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356), November 2000.
[11] SSAB. *Tubular Design Tools*. Достъпно на: https://www.ssab.com/en/support/support-and-tools/calculators-and-tools/tubular-design-tools (посетен на 6 май 2026 г.).