

ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Уређај за испитивање материјала при великим брзинама деформације – Затезни Хопкинсонов штап

Аутори техничког решења

- *Др Мирослав Живковић, ред. проф.*
- *Александар Дишић, истраживач сарадник*
- *Др Радован Славковић, ред. проф.*
- *Мр Мирослав Равлић, дипл.инж.електронике*
- *Мр Родољуб Вујанац, асистент*
- *Мр Драган Ракић, истраживач сарадник*
- *Милан Благојевић, истраживач сарадник*
- *Владимир Миловановић, истраживач сарадник*

Наручилац техничког решења

- Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

Корисник техничког решења

- Факултет инжењерских наука у Крагујевцу

Година када је техничко решење урађено

- 2011-2012

Област технике на коју се техничко решење односи

- Машински материјали, рачунска механика

1. Опис проблема који се решава техничким решењем

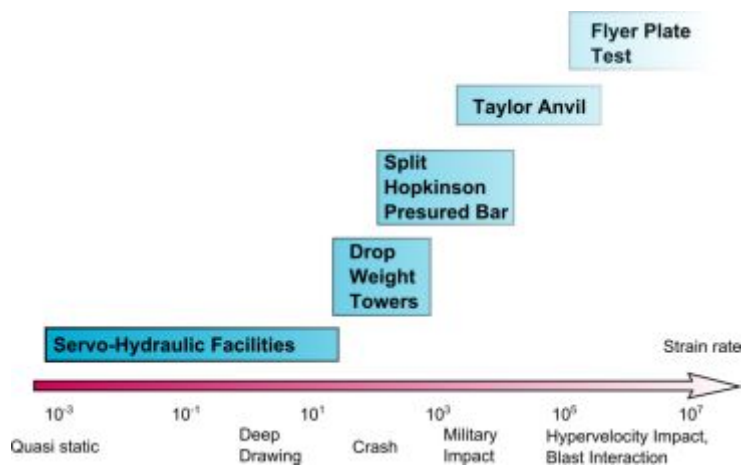
У анализама конструкција које су изложене динамичком оптерећењу, од кључног је значаја познавање и разумевање утицаја брзине деформације на механизам деформисања комплетне конструкције. У последње две деценије, дошло је до наглог раста истраживања једног од облика динамичког оптерећења конструкција који изазива велику брзину деформације: импулсног оптерећења. Судар аутомобила и осталих учесника у саобраћају, удар птице у моторску турбину или труп авиона, обрада метала резањем и обрада метала деформисањем, само су неки од примера у којима се јавља импулсно оптерећење. Ипак, најдоминантнија област са импулсним оптерећењем јесте војна индустрија у својим гранама као што су: балистика, наоружање, противминска заштита, ваздухопловство и др. Извођење експеримената у наведеним областима је веома компликовано и скупо, тако да нумеричко симулирање представља оправдан поступак у анализама динамичког понашања конструкција са великим брзинама деформације.

Развојем рачунарске технике и програма, као први изазов се јавило адекватно дефинисање материјалних карактеристика, не само зависности напона и деформације преко криве течења, већ и дефинисање параметара лома материјала.

Познато је да се већина материјала понаша различито при различитим брзинама деформације и на различитим температурама, тако да је разумевање материјала при екстремним оптерећењима веома значајно у процесу дизајна конструкција или компоненти. Правилно дефинисање конститутивних модела који на најбољи начин описују неки материјал или групу материјала, представља основни проблем у нумеричким анализама. Најкомплетнији облик конститутивних једначина треба да обухвати широк опсег понашања материјала за различите брзине деформација и за различите температуре.

Модел конститутивних једначина се обично деле на емпиријске и физички засноване, у зависности од основних претпоставки. Данашње тенденције су у развоју физички заснованих модела са што ширим спектром брзине деформације.

Одређивање параметара модела конститутивних једначина се своди на њихово експериментално одређивање. За различите брзине деформације, развијене су разне методе. На слици 1 је приказана генерална подела брзина деформација према експерименталним методама [1].



Слика 1. Експерименталне методе за различите брзине деформације [1]

Брзине деформације око $10^3 s^{-1}$ и веће, одговарају такозваним "великим" брзинама деформације. За овај опсег, утицаји инерције, температуре и таласног простирања постају доминантни у понашању материјала. Једна од најраспрострањенијих метода за испитивање материјала при овим брзинама деформације јесте Хопкинсонов штап. Материјалне карактеристике добијене овом методом користе се за материјалне моделе као што су Johnson – Cook, Modifikovani Johnson – Cook, Zerilli – Armstrong.

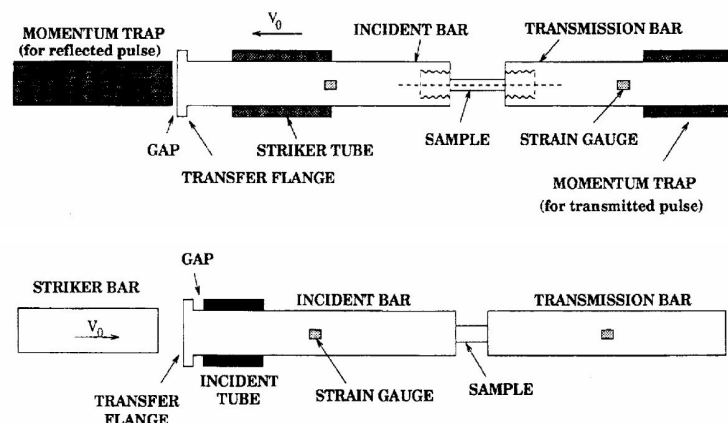
2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења

Назив Хопкинсонов штап потиче од његових изумитеља, Џон Хопкинсон и његовог сина Бертрама. Џон Хопкинсон се бавио динамичком чврстоћом жице помоћу „дроп“ тестова са почетка 1870., док је његов син Бертрам Хопкинсон наставио очев рад са жицама и проширио истраживања на ударе пројектила о еластичан штап са почетком 20-тог века. За идеју постављања узорка између два еластична штапа, заслужан је Колски непосредно после другог светског рата, али се назив Хопкинсонов штап задржао до данас.

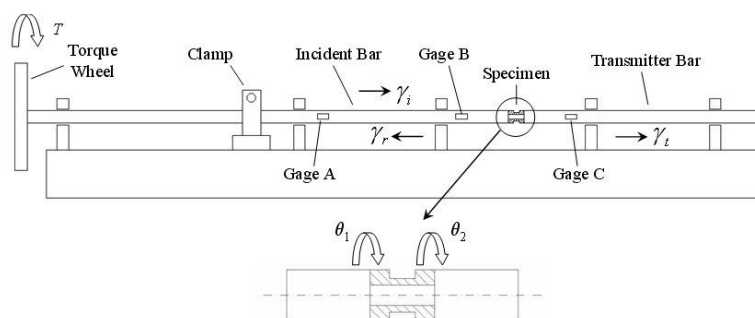
Данас, у свету постоје три варијанте Хопкинсоновог штапа у зависности од природе оптерећења узорка материјала који се испитује:

- Затезни
- Притисни
- Торзиони

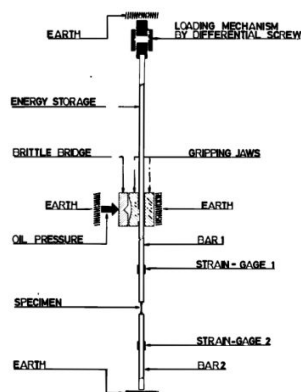
Заједничко за све три наведене варијанте јесте епрувета која се налази између два штапа. Мерењем деформација у оба штапа, на основу једнодимензионе теорије простирања таласа, могуће је одредити криву течења материјала епрувете за дату брзину деформације. На слици 2 су схематски приказана концептуална решења затезног и притисног Хопкинсоновог штапа, док је на слици 3 представљен торзиони штап. Због своје једноставније конструкције и израде, притисни штапови су распрострањенији у односу на затезне. Ипак, због уобичајеног квазистатичког тестирања материјала на стандардним кидалицама, експериментално одређивање материјалних карактеристика помоћу затезних штапова представља боље решење. Главни изазов код затезних штапова јесте генерисање таласа напона са што краћим временом постизања максималне вредности, односно узлазне ивице импулса. Сликаом 4 представљено је решење којим се један део штапа преднапреже, а посебним делом ослобађа.



Слика 2. Схематски приказ затезног и притисног Хопкинсоновог штапа [2]



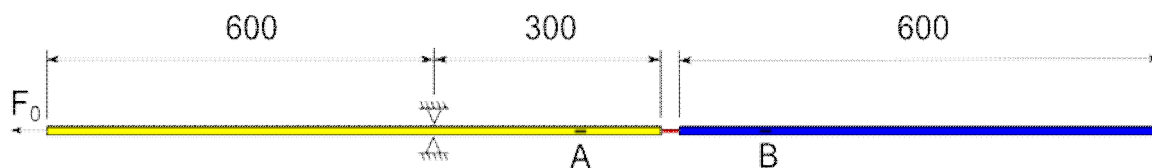
Слика 3. Схематски приказ торзионог Хопкинсоновог штапа



Слика 4. Хопкинсонов штап са преднапрегнутим штапом

3. Суштина техничког решења

Ово техничко решење обухвата затезну варијанту Хопкинсоновог штапа и мотивисано је чињеницом да се код стандардног квазистатичког испитивања материјала врши затезање епрувете. Брзина деформације која се постиже овом експерименталном методом је око 10^3 s^{-1} у зависности од материјала који се испитује. Слика 5 приказује схему изведеног затезног штапа са преднапрезањем. Да би се извршило преднапрезање дела штапа помоћу силе F_0 , прво је потребно остварити укљештење помоћу посебног механизма. Након постизања жељене вредности напона у преднапрегнутом делу штапа, ослобађа се укљештење. Овим се омогућава да једна половина таласа путује лево, а друга половина таласа десно у односу на тачку укљештења. Талас од интереса је онај који се креће ка епрувети и његова вредност се мери помоћу мерне траке у тачки А. Овај талас представља ударни талас и његовим доласком до епрувете, један део се преда епрувети, а други део се одбија и враћа назад ка укљештењу. Талас који је предат епрувети, даље путује кроз епрувету и доласком до другог штапа, опет долази до рефлексије и предаје. Део таласа који се преда другом штапу се мери помоћу друге мерне траке у тачки Б.



Слика 5. Изведени Хопкинсонов штап са преднапрегнутим штапом

Оба штапа се оптерећују само у области еластичности, тако да је у питању једноосно напонско стање еластичних штапова са константним попречним пресеком, при чему се попречно ширење и скупљање зенемарује услед малог односа пречника и дужине штапа. На основу измерених вредности деформација, одређују се напон и деформација у епрувети према једначинама

$$\sigma_{AVG}(t) = \frac{ED_{BAR}^2}{D_s^2} \varepsilon_T(t) \quad \text{и} \quad \varepsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt$$

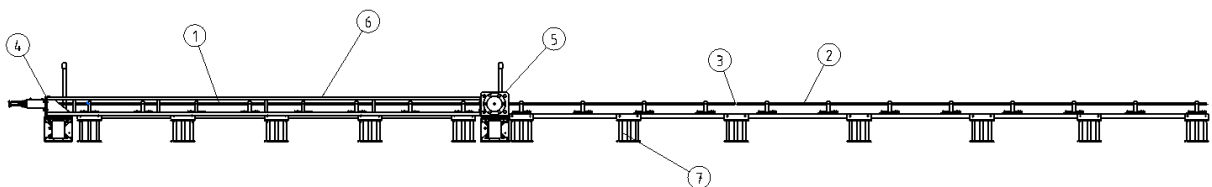
у којима је E модул еластичности штапа, D_{BAR} пречник оба штапа, D_s пречних епрувете, ε_T измерена деформација у тачки Б другог штапа, ε_R рефлектована деформација у тачки А, L дужина епрувете, $C_0 = \sqrt{E/\rho}$, ρ густина и t време.

Механизам којим се остварује укљештење поседује и улогу окидача, односно ослобађања укљештања за кратко време због остваривања кратког узлазног времена генерисаног импулса. То ослобађање се остварује помоћу додатне епрувете чијим ломом нестаје контакт између штапа и притисног елемента.

Због природе процеса којим се долази до тражених карактеристика материјала, поред механизма за остваривање и ослобађање укљештања, решењем је извршена и оптимизација конструкције са аспекта преноса оптерећења на окружење. Сва оптерећења се након ослобађања укљештања, највећим делом задржавају у конструкцији, а само један мањи део се преноси на подлогу. Ово је остварено посебном решеткастом конструкцијом која се налази између хидрауличног цилиндра којим се уноси преднапрезање штапа и хидрауличног цилиндра којим се остварује укљештење.

4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)

На слици 6 је приказано комплетно техничко решење Затезног Хопкинсоновог штапа са свим својим виталним деловима и подсклоповима.



Слика 6. Схематски приказ Затезног Хопкинсоновог штапа

1 – Штап који генерише импулс, 2 – Штап којем се предаје импулс, 3 – Епрувета која се испитује, 4 – Затезни подсклоп, 5 – Подсклоп укљештења и окидача, 6 – Решеткаста конструкција, 7 – Носећа конструкција

Техничке карактеристике овог решења су:

- Брзина деформације – око $10^3 s^{-1}$
- Максимални нормални напон у штапу који генерише импулс – 750 МПа
- Маса уређаја – око 620 kg

- Габаритне мере – 15000x1000x700 mm
- Затезни хидраулични цилиндар – максималног притиска 25 МПа, хода 150 mm и максималне силе 50 kN
- Хидраулични цилиндар за укљештење и окидање - максималног притиска 25 МПа, хода 50 mm и максималне силе 500 kN
- Капацитет резервоара – 5 l
- Двостепене ручне пумпе – променљивог притиска до 4.5 МПа
- Разводник са неповратним вентилом до 25 МПа
- Манометри за читавање притиска у цилиндрима
- Брзина аквизиционог система – 1 MHz
- Мерне траке 120 Ω
- Систем за аквизицију
- Софтвер
- Рачунар

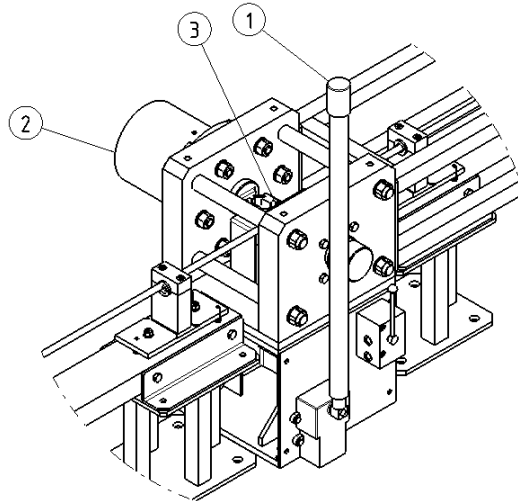
Челична конструкција се састоји од три независне целине:

- решеткасте конструкције која повезује затезни подсколоп са подсклопом укљештења и окидања
- носеће конструкције штапа којим се генерише импулс између два подскопа са хидрауличним цилиндрима
- носеће конструкције слободног краја штапа којим се генерише импулс и штапа којем се предаје импулс

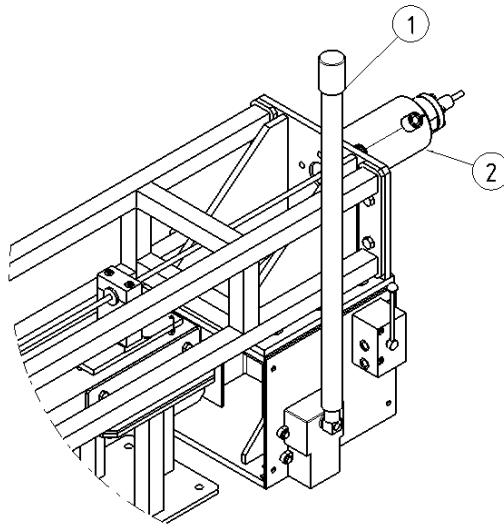
Носеће конструкције су модуларног типа, што омогућава лакшу монтажу и демонтажу када је у питању склапање уређаја. Такође, предност концепта независних целина смањује резултате међусобних интеракција. Решеткаста конструкција са својим подсклоповима у потпуности преузима оптерећења, што омогућава носећим конструкцијама штапова несметано функционисање без међусобног утицаја. Са аспекта мерења импулса овакав концепт је веома битан.

Принцип функционисања решења се може описати кроз следеће фазе:

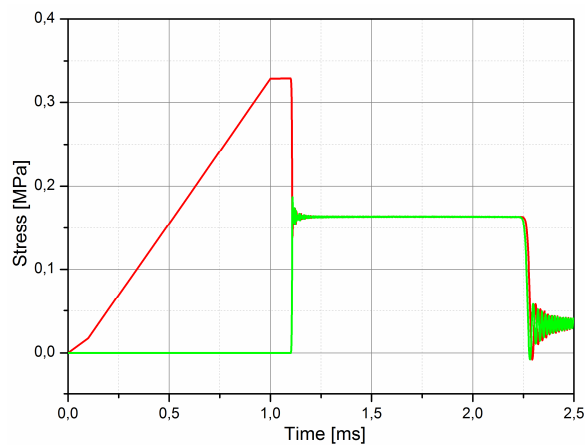
- Постављање епрувете стандардних димензија између два штапа
- Палицом ручне пумпе, слика 7, остварује се одређени ход клипа, односно укљештење
- Палицом ручне пумпе, слика 8, остварује се напрезање штапа до одређеног напона у зависности од жељене брзине деформације за материјал који се испитује. Вредност напона се одређује на основу мерне траке која је залепљена на штапу у којем се генерише импулс.
- Палицом ручне пумпе, слика 7, остварује се додатно кретање клипа хидрауличног цилиндра до тренутка када долази до раздвајања контакта између притисног елемента и штапа.
- Након окидања, половина генерисаног импулса путује према епрувети, а половина у супротном смеру ка затезном цилиндру, слика 9.
- Вредности деформација у штаповима се мере помоћу мерних трака које се налазе на штаповима.



Слика 7. Подсклоп укљештења и окидања
 1 – Палица ручне пумпе, 2 – Хидраулични цилиндар од 500kN, 3 – Укљештење и окидач

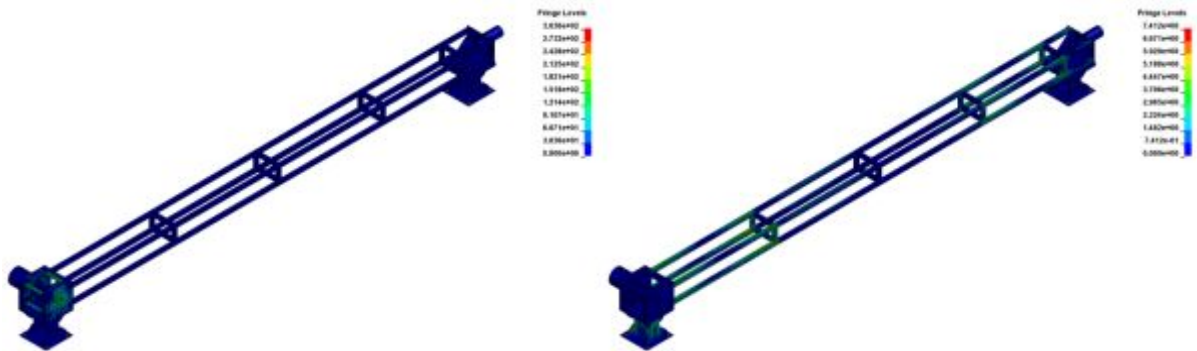


Слика 8. Затезни подсклоп
 1 – Палица ручне пумпе, 2 – Хидраулични цилиндар од 50kN

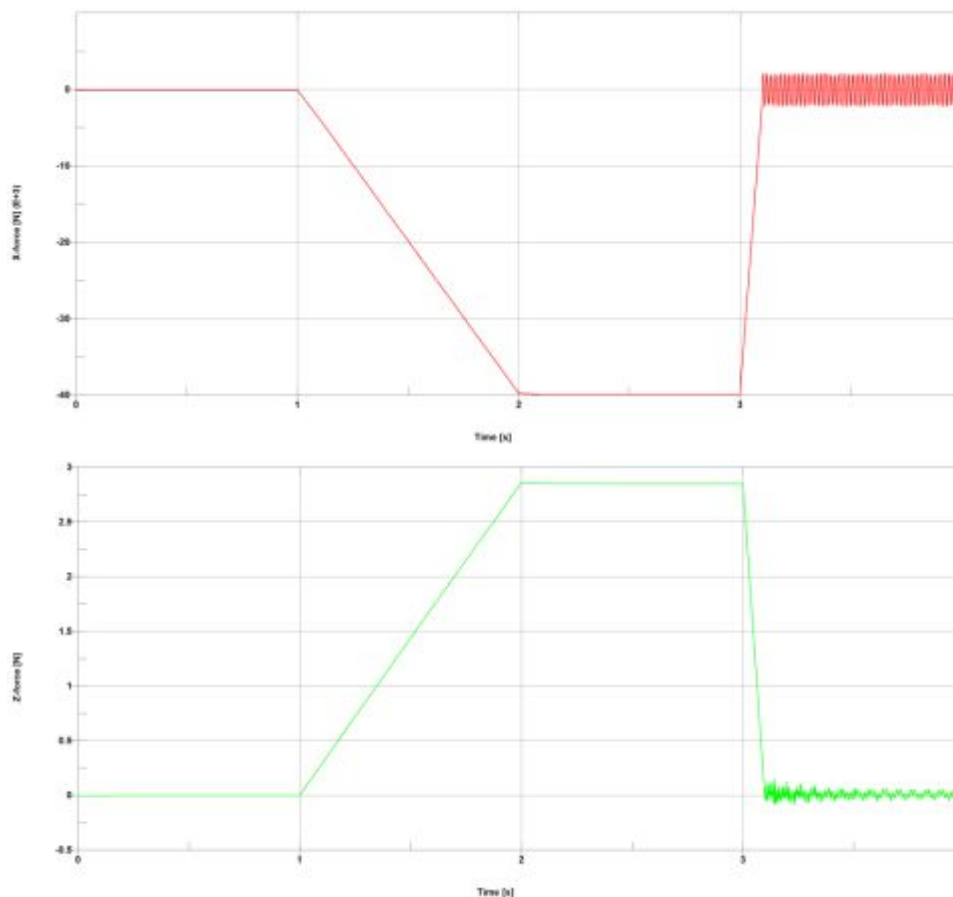


Слика 9. Генерисани напон у затезном штапу (црвена боја) и напонски импулс (зелена боја)

При конструисању уређаја, битан захтев јесте и минималан утицај на окружење, односно минимално преношење оптерећења на подлогу на којој се налази уређај. Остваривање овог захтева подразумевало је коришћење нумеричких симулација. Како је сам процес квазистатички у фази генерисања импулса, а динамички приликом простирања таласа кроз штапове и епрувете, коришћене су имплицитне и експлицитне шеме интеграције. На слици 10 су приказани резултати расподела напона у квазистатичкој и динамичкој фази за решеткасту конструкцију.



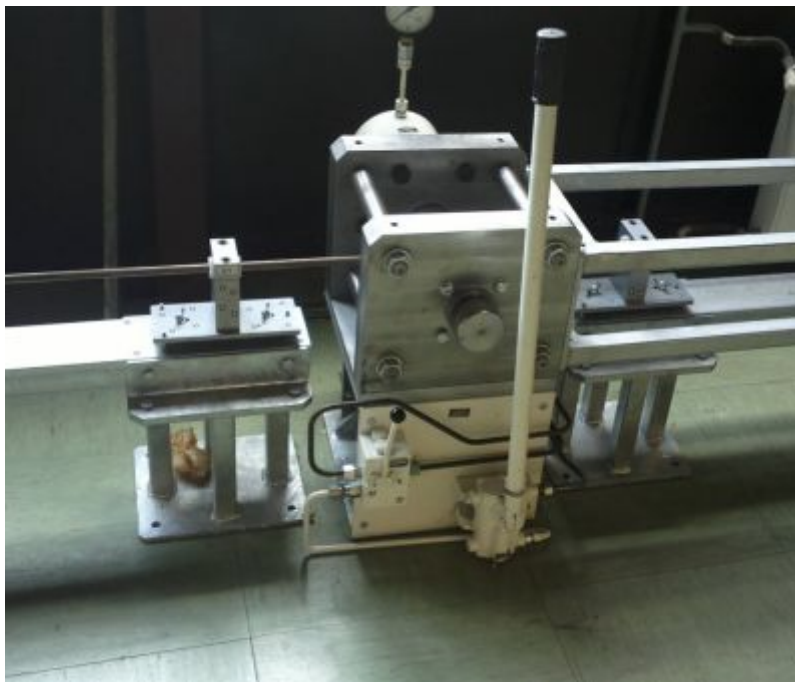
Слика 10. Напонско поље решеткасте конструкције за квазистатичку и динамичку фазу оптерећења



Слика 11. Подужна и попречна реакција ослоња на месту затезног подклопа



Слика 12. Решеткаста конструкција



Слика 13. Подсклоп за укљештење и окидање

Тестирањем уређаја, слике 12 и 13, потврђени су нумерички резултати стабилности система, односно утицаја уређаја на окружење. На основу тога закључује се могућност монтаже на локалитетима без већих техничких захтева. Остваривањем ових могућности, као и након потврде функционалности целокупног експерименталног уређаја, широм се отварају врата ка експерименталним лабораторијским истраживањима у области понашања материјала који су изложени великим брзинама деформације. Потенцијал овог лабораторијског уређаја је огроман у скоро свим научним гранама машинства и као такав је јединствен на овим просторима, а са одређеним решењима је јединствен и у свету.

5 Литература

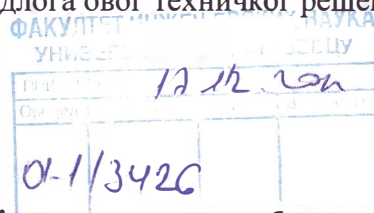
- [1] Zukas J. A., "Impact Dynamics", New York: Wiley-Interscience, 1982.
- [2] Thakur A, Nemat-Nasser S., Vecchio K. S. (1996). "Dynamic Bauschinger effect." *Acta materiala*, **44**, 2797-2807.
- [3] Albertini C. Montagnani M. (1976). "Wave propagation effects in dynamic loading" *Nuclear Engineering and Design*, **37**, 115-124.
- [4] Hiermaier J. S., Structures Under Crash and Impact, *Fraunhofer Institut fur Kuzzeitdynamik*, Freiburg, Germany, 2008.
- [5] Albertini C., Cadoni E., Labibes K, Precision Measurements of Vehicle Crashworthiness by Means of a Large Hopkinson Bar, *European Commission, Joint Research Centre, Institute for Systems, Informatics and Safety, TP 480*, 21 020 Ispra (Va), Italy, 1997.
- [6] LS-DYNA, Keyword user's manuals, Version 971, *Livermore software technology corporation*, Livermore, California, 2007.
- [7] Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н, Метод коначних елемената – Линеарна анализа, *Машички факултет Крагујевац*, Крагујевац, Србија, 1998.
- [8] Јовичић С., Марјановић Н., Основи конструисања, *Факултет инжењерских наука*, Крагујевац, Србија, 2011.
- [9] Kaiser A. M., Advancements in the Split Hopkinson Bar Test, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburg, Virginia, 1998.
- [10] Johnson G. R., Cook W. H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", *Proceedings of the seventh international sym n balli Hague*, The Ne s, 1983, pp. 41-547.
- [11] Allen D. J., Rule W. K., Jones S. E., "Optimaing Material Strength Constants Numerically Extracted from Taylor Impact Data", *Experimental Mechanics*, Volume 37, Number 3, September, 1997.
- [12] Holmquist T. J., Johnson G. R., "Determination of constants and comparison of results for various constitutive models", *Journal de Physique IV, Colloque C3, suppl. au Journal de Physique III*, Vol. 1, 1991, pp. C3-853 - C3-860.
- [13] Lesuer D., "Experimental investigation of material models for Ti-6Al-4V and 2024-T3", *FAA Report DOT/FAA/AR-00/25*, September 2000.
- [14] Follansbee P. S., "High-strain-rate deformation of FCC metals and alloys, in *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*", L.E. Murr, K.P. Staudhammer, and M.A. Meyers, Editions Marcel Dekker Inc., New York, pp. 451-479, 1986.
- [15] Schwer L., "Optional Strain-Rate Forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon_0", 6th European LS-DYNA Users Conference, Gothenburg, Sweden, May 2007
- [16] Дишић А., "Удар и једнодимензионална анализа простирања тала у Хопкинсоновом штапу", Семинарски рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, Србија, 2011.
- [17] Živković M., Dišić A., "Hopkinson bar as most usefully technique in material testing at high strain rate", Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011
- [18] Buyuk M., Loikkanen M., Kan C., "Explicite finite element analysis of 2024-T3/T351 aluminum material under impact loading for airplane engine containment and fragment shielding", *Report DOT/FAA/AR-08/36*, September 2008.

Одлуком Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу бр 01-1/3123-39 од 28.11.2012. године именовани смо за рецензенте техничког решења:

**„Уређај за испитивање материјала при великим брзинама деформације –
Затезни Хопкинсонов штап“**

чији су аутори: *Др Мирослав Живковић, ред. Проф., Александар Дишић, истраживач сарадник, Др Радован Славковић, ред. проф., Мр Мирослав Равлић, дипл. инж електронике, Мр Родољуб Вујанац, асистент, Мр Драган Ракић, истраживач сарадник, Милан Благојевић, истраживач сарадник, Владимир Миловановић, истраживач сарадник.* На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ



Техничко решење „Уређај за испитивање материјала при великим брзинама деформације – Затезни Хопкинсонов штап“ чији су аутори: *Др Мирослав Живковић, ред. Проф., Александар Дишић, истраживач сарадник, Др Радован Славковић, ред. проф., Мр Мирослав Равлић, дипл. инж електронике, Мр Родољуб Вујанац, асистент, Мр Драган Ракић, истраживач сарадник, Милан Благојевић, истраживач сарадник, Владимир Миловановић, истраживач сарадник.* реализован 2010-2012 године, приказан је на 10 страница формата А4, писаних Times New Roman фонтом величине 11, садржи 13 слика. Састављено је из следећих поглавља:

1. Опис проблема који се решава техничким решењем
2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења
3. Суштина техничког решења
4. Детаљан опис техничког решења теоријске основе као и верификациони пример (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)
5. Литература

Техничко решење припада областима: Машинство, Машински материјали, Рачунска механика.

Наручиоци техничког решења је Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Техничко решење је реализовано у оквиру рада не пројекту: **ТР32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема – Министарства за образовање, науку и технолошки развој Републике Србије, 2011-2014.**

Примена предложеног техничког решења се очекује у истраживачким институцијама и гранама индустрије у којима је изражена појава великих брзина деформације (војна индустрија, ауто индустрија и др.).

Тренутно је уређај део опреме Лабораторије за инжењерски софтвер Факултета инжењерства у Крагујевцу.

МИШЉЕЊЕ

Увидом у приложену документацију техничког решења „Уређај за испитивање материјала при великим брзинама деформације – Затезни Хопкинсонов итап“ аутора Др Мирослава Живковића, Александра Дишића, Др Радована Славковића, Мр Мирослава Равлића, Мр Родољуба Вујанца, Мр Драгана Ракића, Милана Благојевића и Владимира Миловановића, следећег смо мишљења:

1. Аутори овог техничког решења су јасно приказали и теоријски обрадили циљ и резултате свога рада у области тестирања материјала и потребе за таквим тестирањима, што представља корак даље у стварању слике о карактеристикама материјала поред досадашњих уобичајених квазистатичких тестирања на кидалицама.
2. Приказано решење, поредећи са другим решењима, поседује и јадан нови аспект који се посебно вреднује у савременом дизајну конструкција, а то је анализа утицаја конструкције на окружење и њена оптимизација. У ту сврху, коришћене су савремене методе пројектовања које укључује примену симулација, односно коначких елемената.
3. Присуство модуларности гобори да се приликом конструисања водило рачуна и о монтажи, односно демонтажи на што једноставнији начин склопова и подсклопова.
4. Техничко решење се може користити у научним и исраживачким установама. Добијени резултати могу да буду спона између научних институција и привредних субјеката (војна индустрија, ауто индустрија...)

На основу изнетог мишљења, сматрамо да приказано техничко решење треба да заузме значајно место у областима савременог одређивања карактеристика материјала, тако да са задовољством предлажемо да се техничко решење под називом „Уређај за испитивање материјала при великим брзинама деформације – Затезни Хопкинсонов итап“ прихвати као техничко решење у категорији "Ново лабораторијско постројење".

12.12.2012., у Крагујевцу


Др Бранко Тадић, ред. проф.


Др Ненад Марјановић, ред. проф.



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет инжењерских наука
Број: ТР-70/2012
20. 12. 2012. године
Крагујевац

Наставно-научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу на својој седници од 20. 12. 2012. године на основу члана 205. Статута Факултета инжењерских наука, донело је

О Д Л У К У

Усвајају се позитивне рецензије техничког решења „Уређај за испитивање материјала при великим брзинама деформације – Затезни Хопкинсонов штап“, аутора др Мирослава Живковића, ред. проф., Александра Дишића, истраживача сарадника, др Радована Славковића, ред. проф., мр Мирослава Равлића, дипл.инж.електронике, мр Родољуба Вујанца, асистента, мр Драгана Ракића, истраживача сарадника, Милана Благојевића, истраживача сарадника и Владимира Миловановића, истраживача сарадника.

Решење припада класи **M83**, према класификацији из Правилника о поступку, начину вредновању, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. Гласник РС“ - бр. 38/2008).

Рецезенти су:

1. **Др Бранко Тадић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Уже научне области: Производно машинство и Индустриски инжењеринг
2. **Др Ненад Марјановић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Уже научне области: Машинске конструкције и механизација

Достављено:

- Ауторима
- Архиви



Др Мирослав Бабић, редовни професор

M.C.