

D. Zavec Pavlinić, J. R. House, I. B. Mekjavić*

PROTUPOŽARNI ODJEVNI SUSTAVI I NJIHOVO VREDNOVANJE

UDK 614.842.86
PRIMLJENO: 28.9.2009.
PRIHVAĆENO: 1.2.2010.

SAŽETAK: U ekstremnim radnim uvjetima, gdje su radnici različitog profila (vatrogasci, radnici na palubama nosača zrakoplova, radnici u kotlovnicama, spasioци, vojnici, itd.) izloženi nastanku i pojavi vatre, od osnovnog značaja su zaštitni odjevni sustavi koji utječu na zaštitu korisnika, učinkovitost tijekom rada i udobnost. Važno je poznavati da li i u kolikoj mjeri se sa zaštitnim odjevnim sustavima štiti korisnik od djelovanja zdravlju štetnim utjecajima i kako takvi sustavi utječu na njegovo zdravlje zbog (ne)udobnosti tijekom rada. U ovom radu prikazan je odjevni sustav za zaštitu od požara koji je vrednovan pomoću požarne lutke (engl. thermo man) sa simulacijom eksplozivne vatre. Analize takvih testiranja obuhvaćaju vrednovanje stupnja opeklina te mogućnost, da korisnik preživi ili ne, kod upotrebe dviju različitih kombinacija zaštitnih odjevnih sustava koji se upotrebljavaju na palubama vojnih brodova Kraljevske mornarice Velike Britanije. Spomenuti odjevni sustavi namijenjeni su za rad na palubama za uzlijetanje, kao i za općenitu uporabu, i predstavljaju određenu mjeru zaštite od požara i povećavaju mogućnost micanja iz požarnog područja. Odjevni sustavi se međusobno razlikuju po vanjskom gornjem sloju, zapaljivom odijelu FWC (engl. foul weather clothing) i nezapaljivom odijelu Perfectos FWC, odnosno po njenoj nezapaljivosti, paropropusnosti, udobnosti i utjecaju na kretanje prilikom nošenja. Oba odjevna sustava tijekom testiranja bila su izložena vatri određeno vrijeme i to 4, 6 ili 8 sekundi. Iz prikazanih rezultata utvrđeno je da je zapaljivo odijelo FWC primjereno za uporabu na palubama za uzlijetanje zrakoplova, jer je zaštita pri izloženosti plamenu za vrijeme 6 sekundi jednaka zaštiti nezapaljivog odijela Perfectos FWC.

Ključne riječi: vatra, zaštitna odjeća, odjevni sustavi za zaštitu od požara, vrednovanje, opeklina

UVOD

Zbog opasnosti od pojava opeklina, radnici koji su tijekom obavljanja svojeg rada izloženi djelovanju vatre, nenadanim eksplozijama goriva ili zračenju topline upotrebljavaju primjerene zaštitne odjevne sustave kao što su rukavice,

kapuljače, gornji slojevi odjeće i odgovarajuća obuća. Iako je dobru zaštitnu opremu od vatre relativno jednostavno oblikovati, ipak treba obratiti posebnu pozornost odabiru s obzirom da je vrijeme nošenja takvih zaštitnih odjevnih sustava ponekad dugo, korisnik u njoj mora učinkovito obavljati svoj rad, te se mora osjećati sigurno i udobno. Zbog toga takva odjeća mora, pored zahtjeva zaštite, ispunjavati još i druge zahtjeve. Jednostavno dodavanje različitih slojeva zaštitnoj odjeći nije dovoljno jer to prije svega ograničava pokretljivost korisnika, povećava težinu tereta kod nošenja i toplinsko opterećenje,

*Dr. sc. Daniela Zavec Pavlinić, Biomed d.o.o., Ljubljana, Slovenija (dzpavlinic@gmail.com), prof. dr. sc. James R. House, Department of Sports Science, University of Portsmouth, United Kingdom, prof. dr. sc. Igor B. Mekjavić, Odjeljenje za avtomatiku, biokibernetiku i robotiku, Institut Jozef Stefan, Ljubljana, Slovenija.

a sve to pridonosi smanjenoj borbenoj učinkovitosti. Odjeća koja se pod djelovanjem topline raspadne zbog prisutnosti umjetnih materijala i na kojoj se zbog čestog djelovanja vatre zapale zatvarač te džepovi predstavljaju prijelaz vatre s tijela prema glavi itd. nije primjerena.

Sa sličnim opasnostima u svojem radu susreće se osoblje Kraljevske mornarice Velike Britanije te zbog toga cijelo radno vrijeme nosi nezapaljiva radna odijela koja predstavljaju određenu mjeru protupožarne zaštite i povećavaju mogućnost micanja s područja požara. Opremljenost nezapaljivom odjećom povećava sigurnost osoblja koje pri nastanku požara započinje gašenje s osnovnim vatrogasnim pomagalicama. Zbog zapaljivosti odjeće pri izlaganju plamenu vrlo lako može doći do manjih ili većih oštećenja. Najveća oštećenja javljaju se u slučaju zapaljenja i gorenja odjeće, pri čemu nastaju opekline koje su često veće i jače nego u slučaju ako je korisnik bez primjerene odjeće, a prije svega ako je početna vatra mala ili traje vrlo kratko vrijeme (*Colver & Colver, 1991., Crown & Dale, 1992., House & Squire, 2004.*). Zbog manje opasnosti vatre na gornjoj palubi nosača zrakoplova nego u međupalublju gdje je micanje pred vatrom lakše, radnici nose odjeću namijenjenu za loše vremenske uvjete FWC (engl. „foul weather clothing“) koja se tradicionalno izrađuje od zapaljivih materijala (npr. najlona). Ali je zbog povećanog rizika od požara na uzletnim palubama, što je posljedica prisutnosti streljiva i goriva za zrakoplove, osoblje na tim radnim mjestima opremljeno s nezapaljivom odjećom, odnosno tzv. Perfectos FWC.

Za optimizaciju zaštitnih odjevnih sustava potrebno je poznavanje svojstava tekstilnih materijala koji su ugrađeni u odjeću jer svaki novi dodani sloj tekstilnog materijala odjevnom sustavu promijeni svojstva zaštite. To znači da se sa svakim dodanim slojem odjeće mora provesti ponovni test. Ispitivanje zapaljivih svojstava tekstilnih materijala može se provesti testiranjem svakog pojedinačnog sloja u laboratoriju, ali takvim testovima se ne dobivaju odgovarajuće informacije. Preporučljivo je testiranje uporabom požarne lutke gdje je moguće simulirati eksplo-

ziju vatre. Ovakvih požarnih lutaka ima u svijetu samo nekoliko, najpoznatiji su Thermo-man iz DuPonta, Pyro-Man iz North Carolina State University, požarna lutka iz University of Alberta, požarna lutka Žiga iz Inštituta Jožef Štefan, Slovenija (*Crown&Dale, 1992.*). Spomenute požarne lutke opremljene su temperaturnim senzovima pomoću kojih se mjeri temperatura po cijeloj površini lutke. Uporabom toplinskog modela kože vrlo lako se iz izmjerene temperature mogu ocijeniti stupanj i lokacija opekline.

Takvim pristupom istraživanjima može se odgovoriti na pitanje pruža li spomenuta odjeća radnicima na nosačima zrakoplova dovoljnu zaštitu od vatre. Osim toga, ako je odjeća FWC zapaljiva, nije poznat njezin prag zapaljenja. Pretpostavi li se da se takva odjeća teško zapali, ona ne predstavlja znatni rizik kada je izložena djelovanju plamena (debeli najlonska tkanina tipa Cordura, na primjer, iako je zapaljiva teško se može zapaliti i obično se upotrebljava za nosive trake na aparatima za disanje za gašenje požara). Potrebno je uzeti u obzir da se na uzletnim palubama nosi zapaljiva FWC odjeća kao zadnji gornji (vanjski) sloj iznad nezapaljivih kombinezona AMR¹, te zato postoji mogućnost da nezapaljivi kombinezoni zadovoljavaju zaštitu u primjeru kad bi se zapaljiva FWC odjeća zapalila u dodiru s vatrom.

Vatra i njezine opasnosti

Opekline su se često javljale u vrijeme rata (*McLean, 2001.*) naročito posadama zrakoplova, oklopnih vozila i brodova. Za oštećenja tih prijevoznih sredstava kobna je visoka eksplozivnost bojnih sredstava koja ne uzrokuju njihovo potpuno uništenje. Djelovanje bojnih sredstava je kobno za posadu koja je prva izložena intenzivnom kratkom djelovanju oružja (1500 kWm²), a kasnije eksplozijama goriva i požarima (2-5 s pri 80 do 135 kW m⁻²); (*Behnke, 1984.*). Radijus zračenja topline i vatre je na oklopnim vozilima i brodovima tako velik da je posada unatoč neozlijeđenosti s balističkim sredstvima izložena opasnostima od nastanka opekline.

¹ AMR - Air Maintenance Rating.

Iako je izgled opekline često ružan ako su površinske, lako zacjeljuju bez nastanka vidljivih ožiljaka (*Boffard, 1993.*). Od nastanka površinskih opekline može nas štititi bilo kakva odjeća (*Cooper et al., 1983.*). Teže opeklinae obično su povezane s prianjanjem odjeće na kožu ili njezinom daljnjem utjecaju na vatru (*Smith&Clark, 1992., Crown et al., 1989.*). U prošlosti su se opeklinae u primjeru, da odjeća nije prianjala na kožu, prije svega pojavljivale na nezaštićenim površinama kao što su ruke i lice (*Saxsl, 1942.; Shafir et al., 1984.*).

Danas je uporaba vatre kao neposrednog oružja na vojnom polju rijetkost, ali postaje sve češća uporaba novije vrste oružja (*Galbraith, 2001.*) koje je bilo nedavno uporabljeno u ratu u Afganistanu za čišćenje šupljina i zgrada, itd. Danas vojska na terenu 'operira' prije svega pomoću helikoptera i kamiona. Njezina primarna uloga je uzdržavanje mira i sprečavanje nemira, a ne direktan napad na neprijatelja. Kao posljedica navedenog, susret je s oružjem kao što su improvizirana eksplozivna tijela i benzinske bombe pomoću kojih se pojavljuje veća mogućnost izloženosti vojnika vatri. To neizbježno vodi do povećane mogućnosti nastanka opekline, pa je stoga uporaba protupožarne/nezapaljive zaštitne odjeće od ključnog značaja.

Zbog opasnosti pojave opekline posade vozila imaju zaštitnu odjeću u koju se ubrajaju između ostalog rukavice i kapuljača kako bi bila zadovoljena njihova maksimalna zaštita od vatre i eksplozije goriva. Danas postoji nekoliko vrsta normi pomoću kojih se određuje otpornost materijala na njihovo prianjanje na kožu pri djelovanju vatre ili toplinskog zračenja (EN 366 & EN 367). Navedene norme služe prije svega pri ocjeni osnovnih svojstava materijala, učinkovitosti različitih obrada materijala koje još više povećavaju stupanj zaštite. Ipak s njihovom uporabom ne može se odrediti stupanj oštećenja i mogućnost preživljavanja vojnika ili spasioca nakon izlaganja vatri. To se može postići uporabom požarne lutke koja omogućava cjelovito ocjenjivanje nedostataka zaštitne odjeće. Važan razlog za uporabu požarne lutke je utvrđivanje namjene odjeće koja pored zašti-

te mora biti udobna, što znači da pored zahtjeva za zaštitom odjeća mora ispunjavati druge zahtjeve.

Vrste vatre

Pri određivanju zaštite vojnika od vatre potrebno je uzeti u obzir karakteristike različitih vrsta vatre:

- *Eksplozija eksploziva* (engl. "Weapons flash"). Otpuštanje topline pri eksploziji eksploziva mjeri se u djelićima sekunde i manje je razorna nego eksplozija i njezin balistički učinak. Jačina topline koja je dosegnuta pri eksploziji iznosi 1500 kW m^{-2} , vrijeme njezinog djelovanja je 40 ms (*Gardner, 1978.*). Jačina otpuštene topline je dovoljno velika da prouzroči površinske opeklinae na izloženim mjestima kao što su ruke, lice itd. (*Cooper et al., 1983.*). Zbog toga u ovom slučaju ne dolazi često do sljepljivanja odjeće s kožom ili nastanka opekline visokog stupnja, osim u slučaju da eksplozija prouzroči lijepljenje kože s drugim zapaljivim sredstvima (*Cooper et al., 1983.*). U većini primjera prisutnost u blizini eksplozija je kobna prije svega zbog djelovanja udarnog vala i oštećenja s balističkim sredstvima, a ne zbog nastanka opekline. Za nastanak opekline osobito je rizična prisutnost u blizini bojnih sredstava kada ne dođe do eksplozije već do jakog gorenja. To se pojavljuje naročito pri ispaljivanju projektila (*HMS, Sheffield, Falklands Conflict, 1982.*) i bombi koji se jako upale i bez eksplozije.
- *Eksplozija goriva*. Pojavljuje se veliki oblak zapaljivog plina koji nastane zbog zapaljenja alkohola ili pogonskog goriva. Jačina otpuštene topline varira od 80 do 135 kW m^{-2} , unutar 2-5 sekundi (*Behnke, 1984.*).
- *Trenutak potpunog zapaljenja*. To je trenutak u kojem se zapali sav zapaljivi materijal u zatvorenom prostoru. Otpuštanje topline i temperatura je u danom trenutku sasvim ovisna o koncentraciji kisika i količini zapaljivog materijala. Pretpostavlja se

da je otpuštanje energije u tom trenutku jednako onoj pri eksploziji goriva. Preživjeti je moguće samo uz uporabu primjerene zaštite za glavu (i ruke), te ako postoji mogućnost izlaza.

- *Zapaljenje plinova.* Neodgovarajuća ventilacija može prouzročiti nastanak vrućih zapaljivih plinova u prostoru gdje je došlo do potpunog zapaljenja. U primjeru da je ponovno uspostavljena normalna ventilacija prostora nastaje eksplozija, a u većim prostorima obično unutar 15 sekundi. Zapaljenje plinova koje je simulirala američka vojna mornarica nastupili su nakon 1,5 do 2 sekundi, plamen je izlazio u dužini od 6 do 8 m iz prostora gdje je provedena simulacija.

Jačina opekline

Jačina opekline definira se opisom obuhvaćene površine i dubine kože. Opekline prvog stupnja je površinsko oštećenje kože koje je bolno i obično ne nastaju mjehuri. Opekline drugog stupnja je površinsko oštećenje kože koje se odražava nastankom mjehura, ali ne izaziva vidljive ožiljke. Opekline trećeg stupnja obuhvaća sve slojeve kože i tkiva ispod nje, te uzrokuje nastanak vidljivih ožiljaka. Obično bol pri opeklini nastupi kad temperatura kože iznosi 44°- 45°C (*Ripple, 1990., Buettner, 1951., Stoll & Green, 1959., Stoll & Chianta, 1971.*) i njezin intenzitet se brzo povećava ako ne nastupi hlađenje. Pri povećanju temperature iznad 44°C za 1°C štetan učinak topline povećava se približno tri puta, što znači da je oštećenje pri 50°C sto puta veće nego kod 44°C. Dovođenjem topline na površinu kože jačinom 16,4 J.cm⁻² izaziva opekline drugog stupnja. Za pojavu opekline trećeg stupnja potrebno je dovođenje topline jačine više od 20,0 J.cm⁻². Uporabom zaštitnih odjernih sustava omogućava se zaštita od štetnog djelovanja topline.

S obzirom na intenzitet, opekline se mogu razvrstati u ove skupine:

- *Opekline prvog stupnja,* iako bolne, ne predstavljaju otežavajuću okolnost pri izlasku iz zapaljenog prostora, traženju ili davanju pomoći. Iako unesrećeni traži da mu se smanji bol, složena medicinska po-

moć nije potrebna jer do oporavka dođe za nekoliko dana. Ovaj stupanj opekline može se usporediti s opeklinama od sunca. Opekline drugog i trećeg stupnja su ozbiljne i unesrećenog potpuno onesposobe pogotovo kad nastanu opekline stopala, ruku ili glave. Opekline tih stupnjeva zahtijevaju složenu i intenzivnu medicinsku pomoć koja obično traje nekoliko dana, tjedana ili mjeseci. U tom primjeru opekline mogu biti kobne, što ovisi o mjestu opekline, ukupnoj površini opečenih dijelova kože, starosti unesrećenog, istovremenosti ozljeda i nužne medicinske pomoći. Prisutnost opekline drugog i trećeg stupnja kod unesrećenog dovodi do njegove nemogućnosti obavljanja radnih dužnosti za dulje vrijeme ili zauvijek.

- U primjeru *jakih opekline lica,* oči su zbog Bellovog fenomena rijetko oštećene. Pri bljesku se očne jabučice pomaknu prema gore i kapci se zatvore tako da zaštite oko. Zbog toga u primjeru izloženosti lica vatri dolazi prije svega do opekline kapaka, oko ostaje nedirnuto što omogućava vid u trenutku izlaska iz prostora vatre. Na osnovi proučavanja unesrećenih s opeklinama trećeg stupnja na predorbitalnom području, studije pokazuju da je 80% svih unesrećenih zbog opekline potpuno onemogućeno u 24 sata, dok ih je 95% od svih normalno funkcioniralo unutar 5 minuta i 70% unutar 30 minuta po ozljedi. Iz toga se može zaključiti da opekline lica ne sprečavaju izlazak iz prostora u kojem djeluje vatra.
- U primjeru daljnje izloženosti vatri mogu se pojaviti *opekline dišnih puteva,* prije svega, ako se ne nosi aparat za disanje. Opekline koje obuhvaćaju dublje slojeve tkiva nisu česte osim u slučaju udisanja pare, a ograničene su na područje usne šupljine, ždrijela i gornjih dišnih puteva. Navedena mjesta opekline zahtijevaju intenzivnu medicinsku pomoć, prije svega, u primjeru pridruženog sekundarnog oštećenja pluća koje nastaje kao posljedica opekline većih površina.

- *Eksplozijske opeklina* - "flash burns". Ove vrste opekline nastaju pri eksploziji jer dolazi do kratkotrajnog i intenzivnog djelovanja topline. Na prvi pogled takve vrste opekline su vrlo jake, dok dugoročno gledano ne ostavljaju ožiljke.

Metodologija

U provedenoj studiji prikazani su značaj testiranja protupožarnih zaštitnih odjevnih sustava pomoću požarne lutke sa simulatorom eksplozivne vatre, vrednovanje dobivenih rezultata sa stajališta nastalih opekline i oštećenja, kao i vrednovanje mogućnosti preživljavanja pri uporabi dviju različitih kombinacija zaštitnih odjevnih sustava namijenjenih radnicima na palubama nosača zrakoplova.

Sustav za testiranje protupožarne zaštite odjevnih sustava

Glavni dio sustava za vrednovanje protupožarne zaštite odjevnih sustava je požarna lutka koja se nalazi u zatvorenom prostoru (slika 1).



Slika 1. Požarna lutka

Figure 1. Thermo man

Požarna lutka opremljena je sa 128 senzora temperature razmještenih po njegovoj površini. Sustav za simulaciju eksplozivne vatre sastavljen je od 12 plinskih plamenika koji se nalaze uokolo požarne lutke. Prije svakog testa potrebno je provesti umjeravanje gdje je gola lutka izložena djelovanju eksplozivne vatre 3 do 4 sekunde. Za svaki senzor temperature izračunava se toplinski tok. S obzirom na to, plamenici moraju biti postavljeni na odgovarajući način da uvijek daju vrijednosti toplinskog toka oko 80 kW/m². Po-

daci koje daje senzor prikupljaju se i prikazuju pomoću programskog rješenja Labview, a cijeli sustav kontrolira jedinica Mitsubishi Programmable Logic Controller (PLC).

Svaki test ujedno kontrolira i operater. Oko 30 sekundi prije svakog testa ventilira se prostor oko lutke kako bi se napunio svježim zrakom. Nakon toga najprije se uključi sigurnosni plamenik da bi se provjerilo paljenje i plinski sustav. Eksplozivna vatra ("flash fire") postiže se gorenjem glavnih plamenika od 2 do 10 sekundi, ovisno o trajanju testa i odjevnog sustava koji se testira. Isključivanjem plamenika vatra se ugasi i do završetka testa pričekava se 120 sekundi kada se uključuje ventilator za brže prozračivanje prostora za testiranje.

Protokol testiranja

U sklopu ovih istraživanja testirane su dvije kombinacije zaštitnih odjevnih sustava koji su bili sastavljeni od jednakog donjeg rublja, jednakih čizmi DMS (engl. Direct Moulded Sole) i nezapaljivog kombinezona AMR. Odjevni sustavi su se međusobno razlikovali po vanjskom gornjem sloju: u jednom sustavu gornji sloj je bilo zapaljivo odijelo FWC, dok je u drugom sustavu gornji sloj bio nezapaljivo odijelo Perfectos FWC. Za svaki spomenuti odjevni sustav provedena su dva ponavljanja. Za svako ponavljanje upotrijebio se sasvim novi komplet odjevnog sustava.

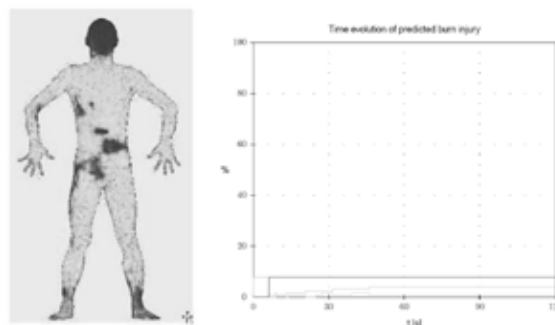
Oba odjevna sustava bila su ispitivana na požarnoj lutki i simulatoru eksplozivnog požara u skladu s međunarodnom normom koja opisuje metodu ispitivanja (*ISO/DIS13506, 2002.*). Navedena međunarodna norma propisuje uporabu požarne lutke veličine odraslog čovjeka. Za simulaciju vatre služi 12 plinskih plamenika (propan) smještenih oko lutke. Svako ispitivanje provedeno je u točno određenim razdobljima koja su trajala 4, 6 i 8 sekundi. Pomoću 128 termoelemenata, raspoređenih po cijeloj površini manikina ('koži'), mjeri se porast temperature na 'koži' u trenutku djelovanja plamena. Mjerenja se bilježe svakih 0,5 s i to na svakom predjelu gdje je smješten termoelement. Na temelju podataka o temperaturi izračunava se toplinski tok (tj. brzina gomilanja topline), što se uspoređuje s modelima opekline ljudske kože kako bi se ustanovilo jesu li

se pojavile opekline. Budući da se oštećenja opeklina zbog prijenosa topline s vrućeg ili gorućeg odjevnog predmeta pojave nakon završnog prvog dovoda plamena, prikupljanje podataka se nastavlja u točno određenom razdoblju nakon prvog dodira s plamenom. Podaci se prikupljaju 120 sekundi uključujući prvi dodir s plamenom.

Vrednovanje protupožarne zaštite odjevnih sustava

Cilj predstavljene studije bio je utvrditi da li zapaljivo odijelo FWC dovoljno zadovoljava zaštitu radnika od vatre na uzletnim palubama nosača zrakoplova ili ne, te da li je nezapaljivo odijelo Perfectos FWC zbog svoje debljine nedobno za nošenje krajnjem korisniku, uz već poznati nedostatak za opću uporabu - visoka cijena. Vrednovanje dobivenih rezultata protupožarne zaštite odjevnih sustava temelji se na procjeni stupnja oštećenja opeklina pri djelovanju plamena na zapaljivo odijelo FWC i nezapaljivo odijelo Perfectos FWC kao gornjeg sloja u zaštitnom odjevnom sustavu. Sastavni dio odjevnog sustava u oba primjera bio je nezapaljivi kombinezon AMR kao unutarnji sloj koji uvelike utječe na moguća oštećenja opeklina. Predviđanje nastanka opeklina i njihovog stupnja moguće je pomoću modela kože (*Juričić et al., 2008., ITC&DC*):

- opekline prvog (1.) stupnja (slika 2, zelena linija) odnosi se na eritem odnosno na crvenilo kože (npr. opekline od sunca) koja boli i izaziva manje smetnje koje zarastaju za nekoliko dana i zdravstvena pomoć nije nužna;
- opekline drugog (2.) stupnja (slika 2, žuta linija) odnosi se na površinske opekline kod kojih je koža djelomično uništena zbog čega se pojavljuju mjehuri; opekline ovog stupnja su bolne, ali ne ostavljaju trajne ožiljke;
- opekline trećeg (3.) stupnja (slika 2, crvena linija) odnosi se na duboke opekline kod kojih je koža potpuno uništena zbog čega je potrebno presađivanje kože. Ove opekline su manje bolne od površinskih opeklina jer su receptori bola u koži uništeni.



Slika 2. Prikaz stupnja opeklina i ovisnost oštećenja opeklina o vremenu

Figure 2. Degree of burns shown against length of exposure time

REZULTATI I RASPRAVA

Opisanim načinom testiranja pomoću požarne lutke i simulatora eksplozivne vatre dobiveni su podaci o stupnju opeklina u primjeru uporabe dvaju opisanih odjevnih sustava koji su bili izloženi djelovanju eksplozivnog plamena u vremenu od 4, 6 i 8 sekundi. Poznato je da opekline 1. stupnja manje utječu na mogućnost pojave velikih oštećenja kože ili na nemogućnost preživljavanja, pa se zato analiza rezultata odnosi na oštećenja opeklina 2. i 3. stupnja.

Odjevni sustav s nezapaljivim gornjim slojem Perfectos FWC nakon što je izložen djelovanju vatre 4 sekunde nije oštećen (slika 3). Međutim, ako je izložen djelovanju vatre 6 i 8 sekundi, plamen na odijelu se ugasio nakon 5 do 10 sekundi. Analiza oštećenja odjevnog sustava obuhvaća razdoblje od 120 sekundi nakon što plamen ugasne. U tom razdoblju odjevni sustav nakon što je izložen djelovanju plamena 6 i 8 sekundi počinje gorjeti, a najprije je počela gorjeti unutarnja podloga Perfectos FWC, a zatim kombinezon AMR koji je gorio do isteka 120 sekundi te je plamen trebalo ugasiti vodom. Uobičajeno mjesto takvog zapaljenja je najčešće donji rub jakne jer je zaštita od plamena manja, odnosno u navedenom odjevnom sustavu upotrijebljen je drugi sloj tekstilnog materijala. Zbog zapaljenja na takvim područjima odjeće (donji rub) dolazi do sve jačeg gorenja unutarnjih slojeva odjeće, što izaziva opekline 2. i 3. stupnja. U navede-

nom primjeru, kod izlaganja odjavnog sustava djelovanju plamena od 8 sekundi, to se dogodilo na 38% tjelesne površine. Ponavljanjem mjerenja dobivena su manja oštećenja opeklinama, i to samo na 14% tjelesne površine što je kao prosječnu vrijednost ukupno dalo 26%. Kako se vatra širi veoma raznoliko oko odjavnog sustava i na odjevni sustav, kolebanja u rezultatima ovisna su o tome kako se plamen uspio probiti ispod donjeg ruba odjeće ili ne.

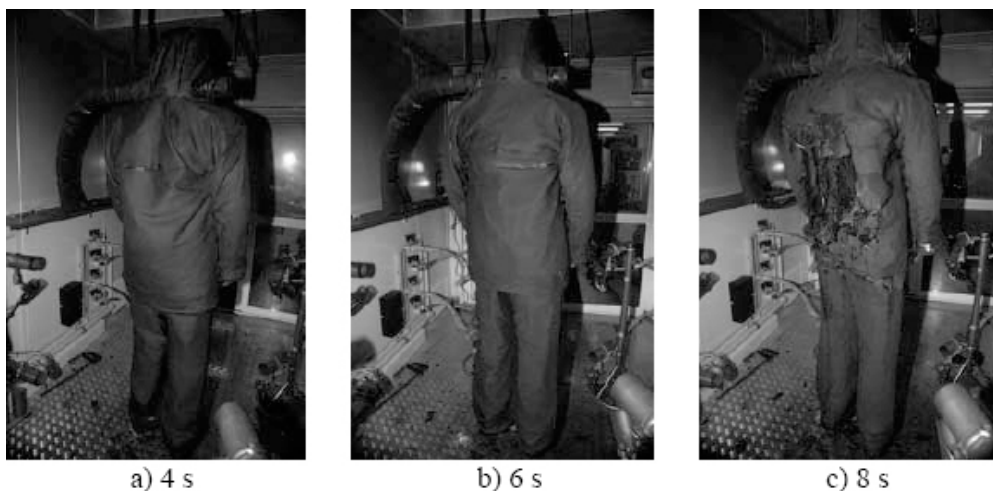
Stupanj vidljivih oštećenja odjavnog sustava povećavao se s povećanjem vremena izloženosti eksplozivnoj vatri. Oštećenost odijela koja

je vidljiva na stražnjem dijelu jakne nakon 8 sekundi izloženosti plamenu nastala je nakon testa u dodiru jakne s posudom za gašenje s rasprskavajućom mlaznicom između gašenja unutarnjih slojeva koji tinjanju. Nakon izloženosti djelovanja plamena odijelo Perfectos FWC nije se značajno skupilo. Skupljanje se uobičajeno pojavi pri inherentno nezapaljivim tkaninama. Iako takva odijela ostanu neoštećena, znatnije skupljanje istisne zrak iz unutarnjih slojeva odjeće, pri čemu se smanjuje toplinska izolacija koja uzrokuje povećani prijenos topline na kožu što za posljedicu ima veća oštećenja.

POGLED SPRIJEDA



POGLED STRAGA



a) 4 s

b) 6 s

c) 8 s

Slika 3. Odjevni sustav s nezapaljivim odijelom Perfectos FWC nakon završne simulacije eksplozivnog požara: a) nakon 4 s; b) nakon 6 s; c) nakon 8 s

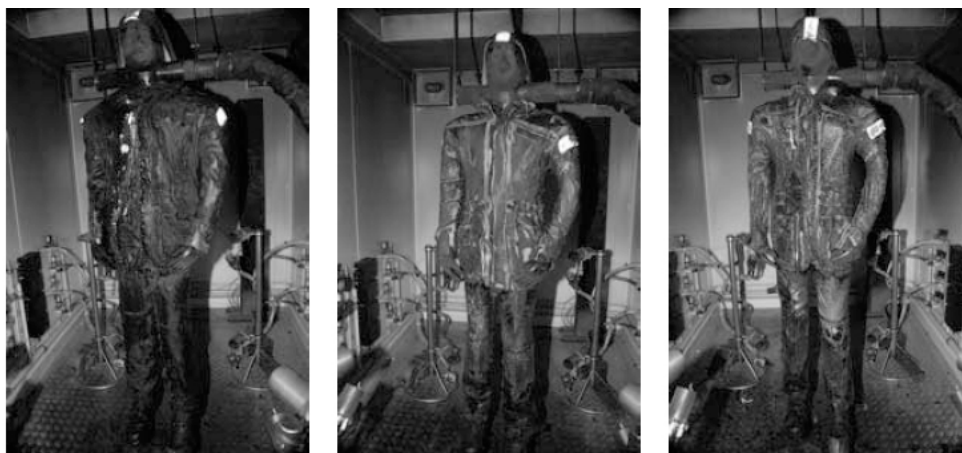
Figure 3. Non-flammable Perfectos FWC after explosive fire simulation a) after 4 seconds; b) after 6 seconds; c) after 8 seconds

Kod odjevnog sustava sa zapaljivim odijelom MkIV FWC po završnoj simulaciji javlja se jak početni plamen koji se brzo ugasio i rasprišio na manje jezičke plamena, prije svega, u području šavova i na stražnjem dijelu koji je izrađen od brzo zapaljivih materijala kao što je elastična vrpca koja se upotrebljava za zatezanje kapuljače i pojasa jakne. Ta manja područja gorenja mogu se lako ugastiti s vodenom maglom nakon isteka 120 sekundi.

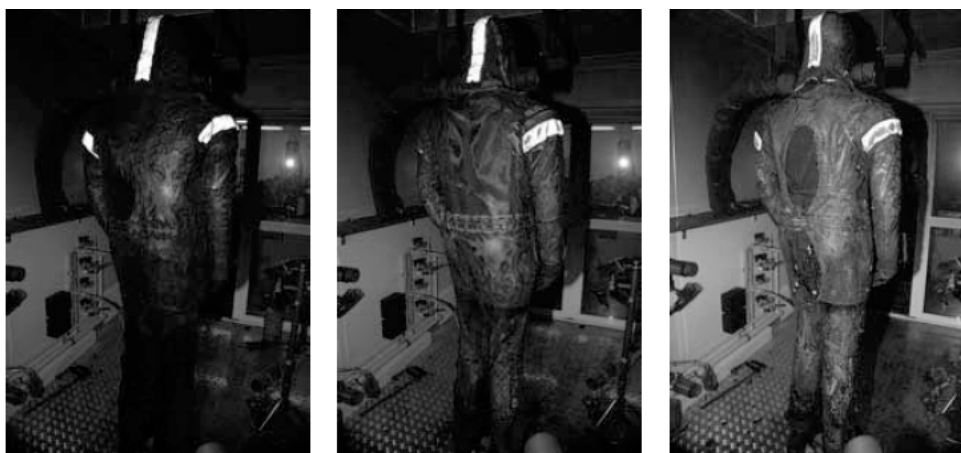
Nakon što je sloj zapaljivog odijela MkIV FWC bio izložen djelovanju plamena 4 sekunde uočeno je oštećenje, ali je ostao cijeli i nije došlo do probijanja tkanine. Vrpca u predjelu struka se zapalila i gorjela je cijelo vrijeme simulacije i

prikupljanja podataka, pri čemu je počeo gorjeti i prednji dio jakne. Nakon 6 sekundi izloženosti djelovanju plamena zapalile su se elastične vrpce i područje čarape jer je izrađen vodoravni šav. U usporedbi s oštećenjima koja su nastala nakon 4 sekunde djelovanja plamena odjevni sustav je bio toliko oštećen da je istovremeno došlo do skupljanja. Nakon 8 sekundi izloženosti djelovanju plamena na odjevnom sustavu su se zapalile elastične vrpce, područja na nogavicama hlača gdje se nalaze vodoravni šavovi, jedan rub hlača i jedna orukvica na jakni. Također je došlo do značajnog skupljanja zbog čega se unutarinja tkanina jakne FWC oštetila, podloga je ostala cijela i malo se skupila. Na kombinezonu AMR nisu bila vidljiva oštećenja nastala zbog taljenja.

POGLED SPRIJEDA



POGLED STRAGA



a) 4 s

b) 6 s

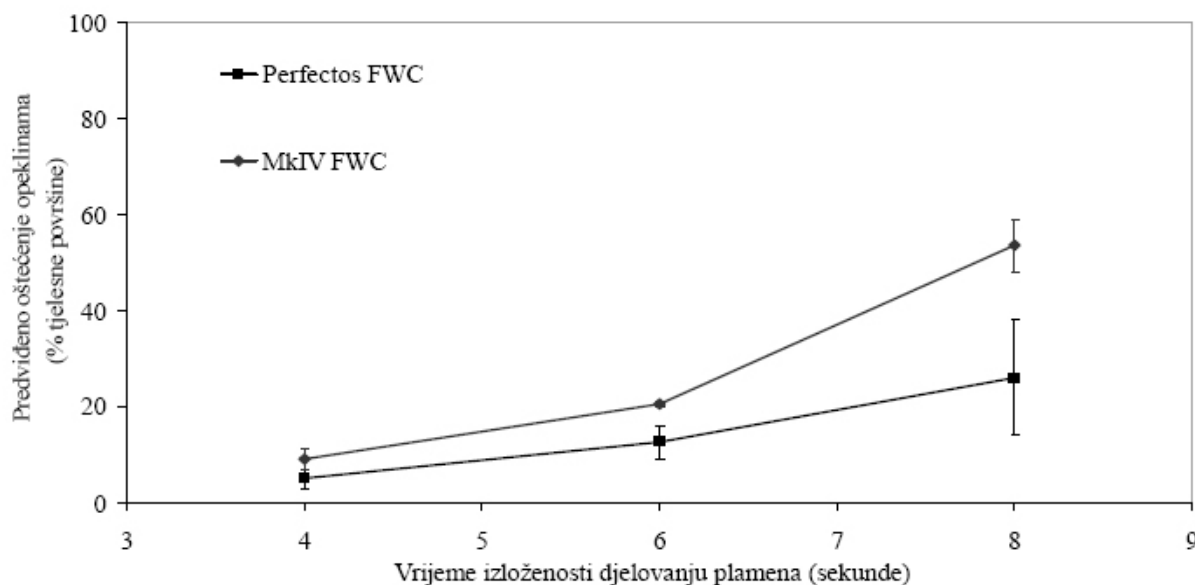
c) 8 s

Slika 4. Odjevni sustav sa zapaljivim odijelom FWC nakon završne simulacije eksplozivnog požara: a) nakon 4 s; b) nakon 6 s; c) nakon 8 s

Figure 4. Flammable FWC after explosive fire simulation a) after 4 seconds; b) after 6 seconds; c) after 8 seconds

Pomoću modela za izračun stupnja oštećenja tijela opeklinama utvrđeno je da nakon 4 sekunde izloženosti plamenu model predviđa da bi se opekline 2. i 3. stupnja pojavile na 5% tjelesne površine ako se nosi odjevni sustav s gornjim nezapaljivim slojem Perfectos FWC i na 9% tjelesne površine pri nošenju odjavnog sustava s gornjim zapaljivim slojem MkIV FWC. Nakon izloženosti odjavnog sustava plamenu 6 sekundi model predviđa da se opekline 2. i 3. stupnja pojavljuju na 13% tjelesne površine pri nošenju odjavnog sustava s gornjim nezapaljivim slojem Perfectos FWC i na 21% tjelesne površine pri nošenju odjavnog sustava s gornjim zapaljivim slojem MkIV FWC. Nakon djelovanja plamena u vremenu 8 sekundi model predviđa da bi se opekline 2. i 3. stupnja pojavile na 26% tjelesne površine pri nošenju odjavnog sustava s gornjim nezapaljivim slojem Perfectos FWC i na 54% tjelesne površine pri nošenju odjavnog sustava s gornjim zapaljivim slojem MkIV FWC.

Stupanj predviđenih oštećenja opeklinama na tjelesnoj površini prikazan je na slici 5.



Slika 5. Prosječno predviđeno oštećenje opeklinama 2. i 3. stupnja nakon potpune izloženosti plamenu u razdoblju do 8 sekundi pri nošenju nezapaljivih kombinacija (AMR) i dvaju različitih gornjih slojeva, tj. Perfectos FWC i MkIV FWC

Figure 5. Average burn damage of degree 2 and 3 after full exposure to flame for up to 8 seconds while wearing non-flammable clothes (AMR) and two different outer layers, Perfectos FWC and MkIV FWC

ZAKLJUČAK

S obzirom na prikazane teoretske osnove o opasnosti vatre i posljedično nastalih oštećenja uzrokovanih opeklinama više je nego očito da se takvim znanjem treba koristiti pri projektiranju i razvoju zaštitnih odjavnih sustava. Rezultati istraživanja usredotočeni samo na eksplozije goriva koje predstavljaju rastući oblak gorućeg plina, a taj nastaje pri zapaljenju tekućeg ili plinovitog goriva i često se pojavljuje pri zrakovitim nesrećama, kažu da eksplozije tog tipa traju od 2 do 5 s, pri čemu se izloženost toplini kreće između 80 kW m^{-2} i 135 kW m^{-2} (Behnke, 1984.). Zbog toga je primjerena usporedba s izloženošću od 84 kW m^{-2} cijele oslobođene toplinske energije u trajanju od 4 do 8 s.

Prema dobivenim rezultatima može se izvesti zaključak da nezapaljivo odijelo Perfectos FWC omogućava odličnu zaštitu od vatre jer su se pri najduljoj izloženosti djelovanju plamena od 8 s pojavile opekline prosječno na 26% cijele tjelesne površine. Nedostatak tog nezapaljivog odijela je donji rub jer je u jednom primjeru pro-

uzročio prodor plamena ispod jakne zbog čega se zapalila unutarnja zapaljiva podloga jakne. Rezultati su potvrdili da gornji sloj MkIV FWC danom odjevnom sustavu pruža manje zaštite kao Perfectos FWC, pri čemu je razlika najmanja pri izloženosti djelovanju plamena 4 i 6 s, a veća pri 8 s. S obzirom na to da je MkIV FWC lagano odijelo, odnosno da odijelo Perfectos FWC sadrži i debelu podlogu koja daje dodatnu izolaciju, razlika je u zaštiti manja od očekivane, jer je odijelo MkIV FWC po završetku izloženosti djelovanja plamenu većinom prestalo gorjeti. Uzrok da se plamen po navedenom odijelu širio dalje pripisuje se ugrađenim elastičnim vrpčama koje nisu bile izrađene od nezapaljivog materijala, kao i vodoravno izvedenim šavovima na nogavicama hlača. U odnosu na izvedena istraživanja smatra se da bi se dodatnim donjim slojem odjevnom sustavu, npr. s dodatnom jaknom od flisa ili jerseyja, najvjerojatnije povećala zaštita trupa što bi rezultiralo smanjenjem stupnja opeklina pri izloženosti plamenu. Broj donjih slojeva u odjevnom sustavu ovisi o podneblju u kojem korisnici nose spomenute odjevne sustave. Preporuča se dodatna izolacija za mediteransko podneblje što ne vrijedi za tropske krajeve. Može se zaključiti da je zapaljivo odijelo MkIV FWC primjereno za uporabu na uzletnim palubama nosača zrakoplova, kao i za svestranu uporabu, najčešće u primjerima gdje korisnici nose odjevne sustave kod kojih su unutarnji slojevi protupožarni, a te njihove protupožarne odjevne sustave dopunjuje se nezapaljivom kapuljačom i rukavicama. Pri optimizaciji zaštitnih odjevnih sustava uvelike su značajni svi njegovi elementi, uključujući zatezne vrpce, zatvarače, različite vrste kopčanja i obuće. Utjecaj na učinkovitost radnika ima masa odjevnog sustava koja ako nije odgovarajuća negativno utječe na izvođenje rada i često dolazi do grešaka i sve većih oštećenja.

Predstavljen način vrednovanja protupožarne zaštite ispitivanih odjevnih sustava pomoću požarne lutke i simulatora eksplozivne vatre gdje se mogu simulirati otežani uvjeti za život posebno je značajan već u fazi njihovog projektiranja. Pored toga primjenom takvih testova može se dobiti uvid u stanje izdržljivosti odjevnog su-

stava nakon npr. izloženosti vatri za unaprijed određeno vrijeme, kao i izdržljivosti pojedinih unutarnjih slojeva. Automatiziran sustav požarne lutke i simulator eksplozivne vatre omogućavaju predviđanje stupnja opeklina korisnika takvog odjevnog sustava i posljedično mogućnost njihovog preživljavanja.

Poznavanjem protupožarnih svojstava zaštitnih odjevnih sustava može se utjecati na sigurnost njihovih korisnika. U procesu projektiranja prototipova zaštitnih odjevnih sustava mogu poslužiti postojeće informacije o stupnju zaštite sličnih odjevnih sustava ako se sastavljaju novi, odnosno optimiraju postojeći zaštitni odjevni sustavi. Također treba istaknuti da svaka promjena samo jednog dijela sustava odjeće unutar odjevnog sustava zahtijeva ponovno testiranje i optimizaciju.

LITERATURA

Behnke, W.P.: Predicting flash fire protection of clothing from laboratory tests using second degree burn to rate performance, *Fire and Materials*, 8, 1984., 2, 57-63.

Boffard, K.D. & MacFarlane, C.: Urban bomb blast injuries: Patterns of injury and treatment. *Surgery Annual*, 25, 1993., 1, 29-47.

Buettner, K.: Effects of Extreme Heat and Cold on Human Skin. I. Analysis of Temperature Changes Caused by Different Kinds of Heat Application, *Journal of Applied Physiology*, 3, 1951., 691.

Colver, C.P. & Colver J.C.: Managers, workers must realize need for flame-retardant clothing, *Occupational Health and Safety*, 60, 1991., 1, 20-23.

Cooper, G.J., Maynard, R.L., Cross, N.L. & Hill, J.F.: Casualties from terrorist bombings. *The Journal of Trauma*, 23, 1983., 11, 955-967.

Crown, E.M. & Dale, J. D.: *Evaluation of flash fire protective clothing using an instrumented mannequin*, Report, University of Alberta, 1992.

Crown, E.M., Rigakis, K.B. & Dale, J.D.: *Systematic assessment of protective clothing for Alberta health workers (Vol 1.)*, Final research project report for Alberta Occupational Health and Safety Heritage Grant Program, Edmonton, Alberta, 1989.

EN 366 – Protective clothing. Protection against heat and fire. Method of test: evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat, 1993.

EN 367 – Protective clothing. Protection against heat and fire. Method for determining heat transmission on exposure to flame, 1992.

Galbraith, K.A.: Combat casualties in the first decade of the 21st century, New and emerging weapon systems, *Journal of the Royal Army Corps*, 147, 2001., 7-14.

Gardner, L. Simpson, G.N. & Cox, A.F.J.: *Flash Protection programme for image intensifiers-Warminster trials*, Royal Signals & Radar Establishment Memorandum 3430, 1978.

House, J.R. & Squire, J.D.: Effectiveness of Proban flame retardant in used clothing, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 16, 2004., 4, 361-367.

House, J.R. & Mekjavić, I.B.: Using flame manikin to ensure safety and enhance operational capability in military, industrial and rescue services, *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Ergonomics*, ICEE 2007, Mekjavić, Igor B. (ur.),

Kounalakis, Stelios N. (ur.), Taylor, Nigel A.S. (ur.), pp. 186-189, Piran, Slovenia, August 19-24 (2007).

ISO/DIS13506, 2002.

Juričić, D., Musizza, B., Gašperin, M., Vrhovec, M., Dolanc, G., Mekjavić, I. & Zavec Pavlinić, D.: System for evaluation of fire protective garments, *4th International textile, clothing & design conference – Magic World of Textiles*, 5 - 8 Oktober 2008, Dubrovnik, Croatia.

McLean, A.D.: Burns and military clothing, *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 147, 2001., 97-106.

Saxl, N.T.: Burns en masse, *US Naval Medical Bulletin*, 40, 1942., 570-576.

Shafir, R., Nili, E & Kedekm, R.: Burn injury and prevention in the Lebanon War 1982., *Israel Journal of Medicine Sciences*, 20, 1984., 311-313.

Smith, G.R. & Clark, P.: *The introduction of fire resistant programs in Alberta. Performance of Protective Clothing: 4th volume*, ASTM STP 1113. McBriarty, J.P. & Henry, N.W. Eds. American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1992., 496-506.

Stoll, A.M. & Greene, L.C.: Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation, *Journal of Applied Physiology*, 14, 1959., 373.

CLOTHING FOR FIRE PROTECTION AND THEIR EVALUATION

SUMMARY: In extreme work conditions where workers are exposed to fire (firemen, workers at aircraft-carrying ships, workers in boiler rooms, rescuers, military troupes, etc.) protective clothing is of singular importance in ensuring user protection, comfort and work efficacy. It is important to know how much protective clothing in fact protects users from harmful environments and how they affect user's health and comfort in the course of work. The paper discusses the fire-fighter's clothing evaluated by means of a thermo man in the situation of simulated explosive fire.

Tests such as this one have given some indication of the possible degree of burns and of user survival when using two different combinations of protective clothing used on navy ships of the Royal Navy in Great Britain. These clothes are intended for work at take-off strips on ships and for general use. They provide certain protection from fire and increase the chance of removal from fire-affected zones. The clothes differ in the outer flammable layer of the FWC (foul weather clothing) and non-flammable Perfectos FWC, i.e. in their resistance to fire, degree of ventilation, comfort and effect on movement while worn.

Both types of clothing were exposed to fire in the tests for a duration of 4, 6 and 8 seconds. The results show that the flammable FWC was suitable for use at take-off strips on ships, as the protection in exposure to flame for 6 seconds is equal to the protection provided by the non-flammable clothes Perfectos FWC.

Key words: *fire, protective clothing, protective clothing for use in fire, evaluation, burns*

Subject review

Received: 2009-09-28

Accepted: 2010-02-01