



Modello coesivo per l'analisi del processo di *spall* nel rame puro

A. Ruggiero, N. Bonora, L. Esposito, G. Iannitti

Università di Cassino, DiMSAT, via G. Di Biasio, 43 - 03043 Cassino (FR); a.ruggiero@unicas.it

G.T. Gray III

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA

RIASSUNTO. Il danno duttile che si realizza nelle configurazioni d'impatto planare e che, se sufficientemente severo può risultare nella frattura per *spall*, è accompagnato a notevoli fenomeni dissipativi. Per tenere in conto tale dissipazione, che gli autori associano ad un meccanismo di plasticità localizzata, che si realizza alla mesoscala, intorno ai micro vuoti nucleati per danneggiamento, si è sviluppato un modello numerico che utilizza elementi coesivi. Tale modello è stato utilizzato per investigare l'evoluzione del danno e l'accumulo di deformazione plastica nel Flyer Plate Impact Test con differenti profili di carico (onda quadra ed onda triangolare), su rame puro, con l'obiettivo di ottenere una maggiore comprensione dei processi legati alla frattura per *spall*. Il confronto tra i risultati numerici e i dati sperimentali, [1], disponibili sia in termini di profili di velocità, con particolare riferimento al pull back, sia in forma di metallografie dei dischi impattati, sembra confermare la correttezza del modello proposto e la sua capacità di catturare le caratteristiche distintive osservate negli esperimenti di *spall* effettuati sia con profili quadri che triangolari.

PAROLE CHIAVE. Elementi coesivi; *Spall*; Dinamica dell'impatto; CDM.

INTRODUZIONE

La "dinamica dell'impatto" può essere un'opportunità per la verifica dei modelli che descrivono la risposta meccanica dei materiali, poiché richiede la capacità di riprodurre l'evoluzione nel tempo di complessi processi di deformazione. Il Flyer Plate Impact Test è comunemente accettato come una tecnica sperimentale consolidata per la determinazione della risposta meccanica dei materiali in condizione di elevate velocità di deformazione ($>10^4$ s⁻¹). Tuttavia, in differenti configurazioni, può essere utilizzato per validare le capacità predittive di modelli costitutivi e/o di danno.

L'esperimento, nella configurazione classica, consiste nel realizzare un impatto planare, a velocità nota, tra due dischi sottili. La risposta del materiale alla sollecitazione di shock generata e informazioni quali il valore del limite elastico di Hugoniot, la velocità di propagazione delle onde di sforzo nel solido, la curva di Hugoniot, etc., possono essere ricavate dalla lettura del profilo di velocità nel tempo di un punto situato sulla superficie posteriore del disco bersaglio; un esempio di profilo tipico è riportato in Fig. 1. Nel disco bersaglio, la sovrapposizione delle onde di rilascio generate sulle superfici libere dei dischi genera un'onda di trazione che può portare il materiale alla rottura per *spall*. A seguito di tale rottura si genera un'ulteriore onda di rilascio che, una volta giunta sulla superficie posteriore del disco bersaglio, modifica il profilo di velocità generando il caratteristico segnale di *pull back*, noto anche col termine *spall signal*.

Sulla base di questa tecnica, possono essere progettati esperimenti differenti, quali l'*HIE-driven experiment* o lo *shock-resock experiment*, che possono evidenziare criticità nella modellazione costitutiva (legate agli effetti della velocità di deformazione e della temperatura, al ruolo dell'equazione di stato, alla formulazione del modello di danno, etc.) o ad aspetti più propriamente numerici (quali il *damping*, lo smorzamento numerico, la viscosità artificiale, effetti della dimensione della *mesh*, gli algoritmi di contatto, etc.).



Esperimenti con differenti profili dell'onda di shock possono essere utilizzati per verificare le capacità previsionali dei modelli costitutivi rispetto a differenti durate dell'impulso, rampe di carico e velocità di deformazione. Nel presente lavoro i risultati sperimentali riportati da Koller *et al.* [1] per impatti planari su rame puro, con diversi profili delle onde di sollecitazione e diverse pressioni, sono stati utilizzati per verificare le potenzialità di un modello numerico, che utilizza elementi coesivi, sviluppato per prevedere le condizioni di cedimento per *spall*.

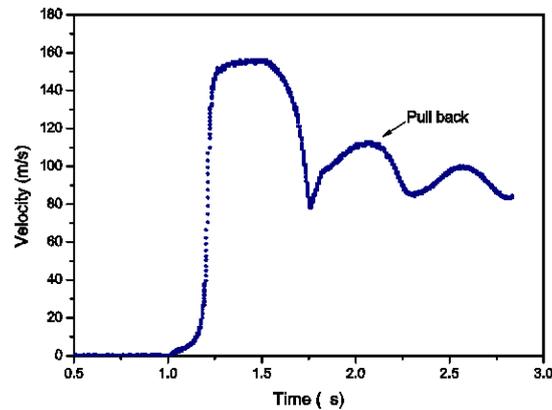


Figura 1: Profilo di velocità tipico di un Flyer Plate Impact Test

EVIDENZE SPERIMENTALI

Le configurazioni sperimentali prese come riferimento sono riportate in Koller *et al.* [1] e riguardano l'impatto planare su rame puro 99.99% (OFHC) ricotto con la generazione, a due diversi livelli di pressione (3 e 8 GPa), di due diversi profili di carico, quadro (*flat top*) e triangolare (*triangle*). Un metodo per confrontare le due diverse tipologie d'onda prevede di operare a parità di picco di pressione. Poiché durante la propagazione l'onda triangolare decresce continuamente, si sceglie di operare il confronto a parità di picco sulla superficie posteriore (i.e. parità di picco sul profilo di velocità). Come conseguenza di ciò, all'impatto e su gran parte dello spessore, l'onda triangolare ha un picco più elevato rispetto a quella quadra. Poiché per profili triangolari lo *spall* si genera in una regione prossima alla superficie posteriore del disco, tale scelta garantisce che sui rispettivi piani di *spall* il picco di pressione nelle due configurazioni sia con una buona approssimazione lo stesso.

I risultati sperimentali per le quattro configurazioni sono disponibili sia in termini di profili di velocità, Fig. 2, sia in forma di metallografie dei dischi impattati, Fig. 3, e possono essere sintetizzati come di seguito.

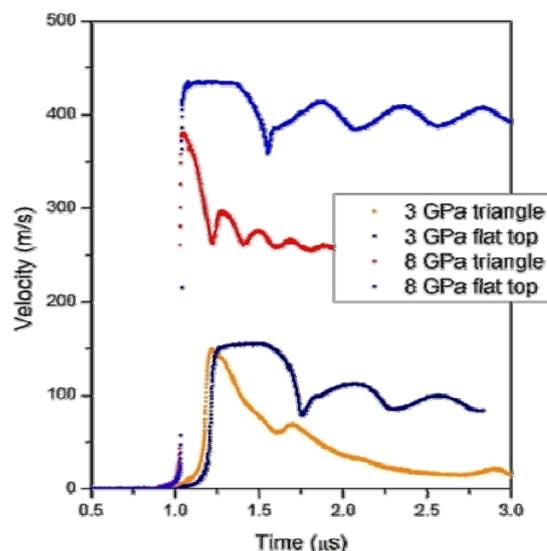


Figura 2: Profili di velocità ottenuti per le differenti configurazioni d'impatto (Koller *et al.* [1]).

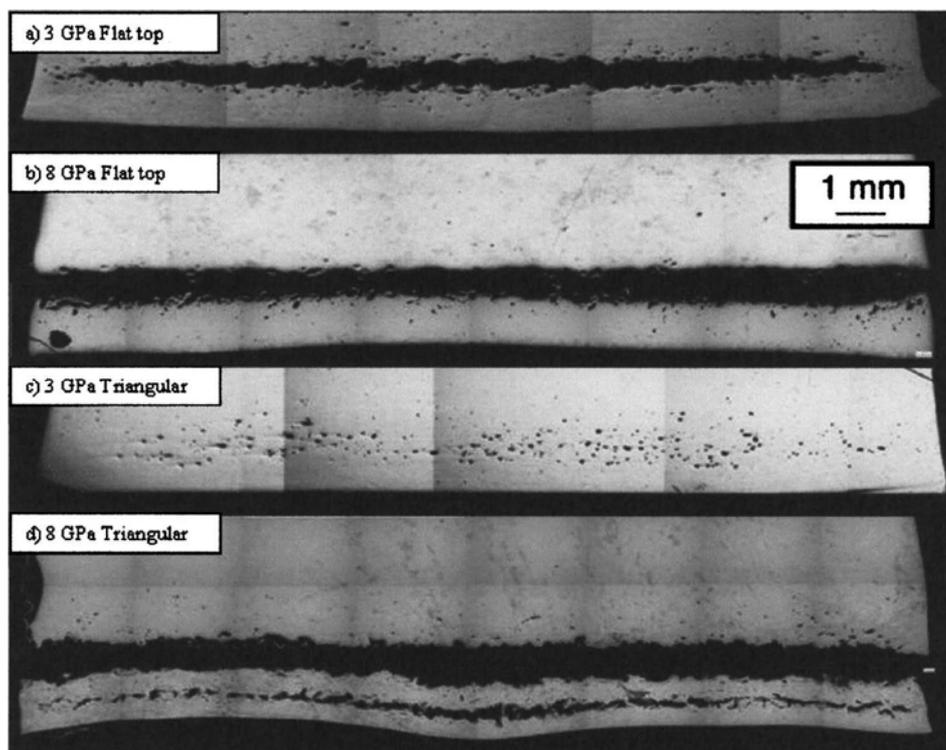


Figura 3: Metallografie dei dischi impattati nella regione di spall (Koller *et al.* [1]).

Per quanto riguarda le configurazioni con onda quadra, ad entrambe le pressioni è stata verificata la frattura per *spall*, distinguibile sia dal *pull back* presente nei profili di velocità sia dall'osservazione delle metallografie. Dalla frequenza delle ondulazioni dello *spall signal*, è possibile ricavare lo spessore del frammento che si è distaccato a seguito della frattura; utilizzando tale metodo si ricavano spessori di circa 1.16 e 1.12 mm rispettivamente per gli esperimenti a 3 e 8 GPa. Tali stime sono in buon accordo con le misure ottenute al SEM approssimativamente di 1.15 (3 GPa) e 1.08 mm (8 GPa).

Per le due configurazioni con profilo triangolare, si hanno due diversi risultati per i due livelli di pressione. Per il caso a 3 GPa, l'assenza, nel profilo di velocità, delle ondulazioni tipiche dello *spall signal* suggerisce che non ci sia stata generazione di superficie libera per *spall*; tuttavia un lieve segnale di risalita indica un fenomeno di riflessione delle onde di sforzo che potrebbe essere il risultato della presenza di danno nel materiale. Tale danno effettivamente è riscontrabile nelle micrografie, in forma di micro vuoti, Fig. 3. Il profilo di velocità relativo alla pressione di 8 GPa indica chiaramente l'avvenuta frattura per *spall*. Dalla frequenza delle ondulazione nel *pull back* si calcola uno spessore del frammento di circa 0.46 mm. Come ben visibile in Fig.3, si è generato un *multi-spall* con la creazione di due superfici libere ad una distanza di circa 0.47 e 1.16 mm dalla superficie posteriore del disco.

Un ulteriore risultato notevole che si osserva negli esperimenti di *spall* è dato dal fatto che la risalita del *pull back*, in tutte le configurazioni in cui si realizza lo *spall*, è sempre inferiore al valore massimo di velocità, indicando una notevole dissipazione d'energia durante i processi di deformazione che portano alla frattura. Tale aspetto è stato già trattato dagli autori in [2] dove si è dimostrato che un modello sviluppato utilizzando gli elementi coesivi per tenere in conto tale dissipazione è in grado di riprodurre le caratteristiche fondamentali dei profili di velocità misurati. Partendo dall'esperienza maturata, nel presente lavoro si intende ulteriormente sviluppare il modello coesivo per esplorare la possibilità di prevedere la risposta meccanica del materiale nelle diverse configurazioni di pressioni e profili delle onde di carico.

MODELLO COESIVO

Le simulazioni numeriche delle configurazioni con profilo d'onda quadra, condotte in Bonora *et al.* [2], hanno evidenziato la possibilità, con l'impiego di un modello basato sulla Continuum Damage Mechanics (CDM), [3], di prevedere in modo accurato l'istante della frattura e la posizione del piano di *spall*, Fig. 4. Tuttavia, l'impossibilità di prevedere accuratamente l'evoluzione del segnale di *pull back* indica la presenza di processi dissipativi che il modello non

è in grado di tenere in conto. Bonora *et al* [2] hanno mostrato la possibilità di considerare tale dissipazione utilizzando elementi coesivi a cavallo del piano di *spall*.

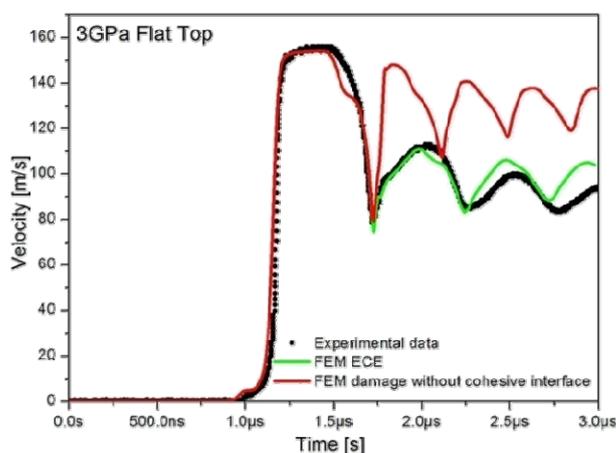


Figura 4: Confronto tra i profili di velocità misurati e quelli calcolati in [2], per onda quadra a 3 GPa.

È opinione degli autori che i processi dissipativi che si manifestano nel materiale, quando è soggetto a stati tensionali di sforzo, sono la chiave per la comprensione e la previsione delle caratteristiche osservate negli esperimenti. La dissipazione di energia può essere causata o dai processi di danneggiamento o dalla deformazione plastica. In accordo con la formulazione del modello CDM utilizzato, l'energia dissipata per unità di volume a causa dei meccanismi di danneggiamento è dell'ordine di 10^{-1} N/mm², ben inferiore a quella necessaria a giustificare le discrepanze osservate nel segnale di *pull back*. Di conseguenza, gran parte della dissipazione deve essere imputata alla deformazione plastica; tuttavia ciò è in contrasto col fatto che in condizioni di deformazione uniassiale, a causa dell'altissimo valore della triassialità dello stato di sforzo che si viene a realizzare (teoricamente per $\epsilon_p=0.05$ si dovrebbe avere $\sigma_m/\sigma_{eq}=65!$), il materiale dovrebbe esibire una duttilità molto limitata. L'energia che deve essere dissipata per unità di volume con gli elementi coesivi per trovare l'accordo con i risultati sperimentali è di circa 1.25 kN/mm²: livello di energia compatibile con il lavoro plastico che può essere compiuto in condizioni di stato di sforzo uniassiale, in cui il materiale può esibire gran parte della propria duttilità.

Una spiegazione di questa apparente incongruenza potrebbe essere fornita dal possibile meccanismo di seguito illustrato: la comparsa del danno, in forma di nucleazione dei micro vuoti, causa una caduta del livello medio di triassialità nei legamenti tra i vuoti; come risultato di tale diminuzione della triassialità, il materiale che circonda le cavità può esibire una maggiore duttilità; aumento di duttilità che è ulteriormente favorito dall'aumento di temperatura dovuto all'adiabaticità dei processi di deformazione in regime dinamico.

A supporto di tale teoria ci sono evidenze sperimentali dell'incremento relativo di deformazione plastica nel materiale che circonda i micro vuoti. Minich and Sofronis [4], ad esempio, riportano una misura della durezza, una grandezza direttamente correlata alla deformazione plastica, in funzione della distanza dai vuoti per un alluminio sottoposto ad un carico da shock, Fig. 5.

Un limite evidente del modello proposto in [2] è dato dal fatto che l'intera dissipazione è concentrata a cavallo del piano di *spall*. Tale vincolo infatti rende il modello incapace di descrivere processi dissipativi che si possono avere nelle situazioni in cui, come per la configurazione a 3 GPa ed impulso triangolare, c'è danneggiamento indicato dalla nucleazione di microvuoti, ma non c'è la generazione di un piano di *spall*. Per superare tali limitazioni e investigare in maniera più approfondita la natura dei processi dissipativi, è stato sviluppato lo schema di seguito descritto:

- la configurazione di deformazione uniassiale, che si realizza per le configurazioni d'impatto planare, è stata modellata con una singola striscia di elementi in configurazione piana (*plain strain*), con i nodi vincolati in modo da evitare deformazioni in senso radiale; tale modello è solitamente indicato in letteratura come Single Strip Model (SSM);
- gli elementi continui isoparametrici a quattro nodi e quattro punti di Gauss, che discretizzano lo spessore del disco bersaglio, sono connessi tra di loro con elementi coesivi d'interfaccia a spessore nullo, Fig. 6a;
- si calibra la legge coesiva di tali elementi su una configurazione di riferimento, imponendo che i due segnali di *pull back*, calcolato e misurato, coincidessero.

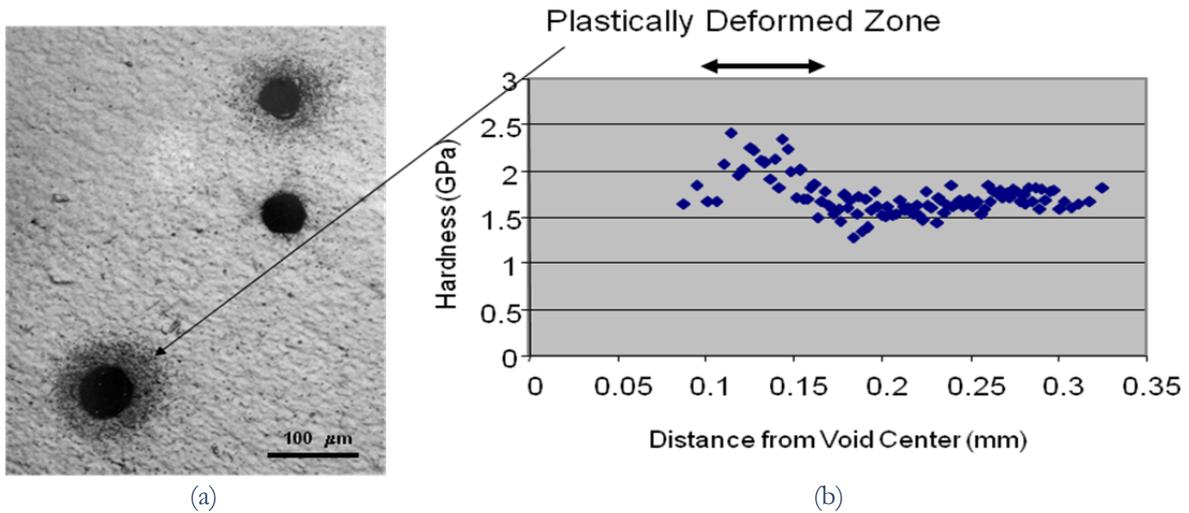


Figura 5: a) Andamento della durezza in funzione della distanza dal centro dei micro vuoti per l'alluminio; b) relativa micrografia, [4].

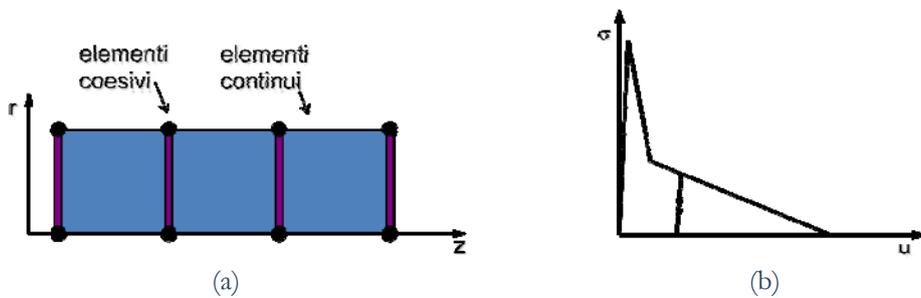


Figura 6: a) Single Strip Model con elementi continui connessi tramite elementi coesivi; b) schema della legge coesiva utilizzata.

Si sottolinea che lo scopo degli elementi coesivi è quello di riportare, alla scala del continuo, l'energia dissipata in processi di deformazione plastica che si hanno alla micro scala. Per adempiere a tale scopo si è dovuto imporre che una volta superata la soglia di inizio dissipazione (picco di tensione nella legge coesiva) lo scarico eventuale, diversamente alle leggi coesive più diffuse, non andasse ad un valore di spostamento nullo per tensioni pari a zero, ma scendesse con una rapa simile a quella della rampa di salita; similmente a quanto avviene con gli scarichi elastici in una curva sforzo deformazione per un metallo, Fig. 6b. L'andamento bilineare della legge è stato determinato dal processo di calibrazione, che si è effettuato sulla configurazione a 3GPa per onda quadra, il cui risultato è riportato in Fig. 7.

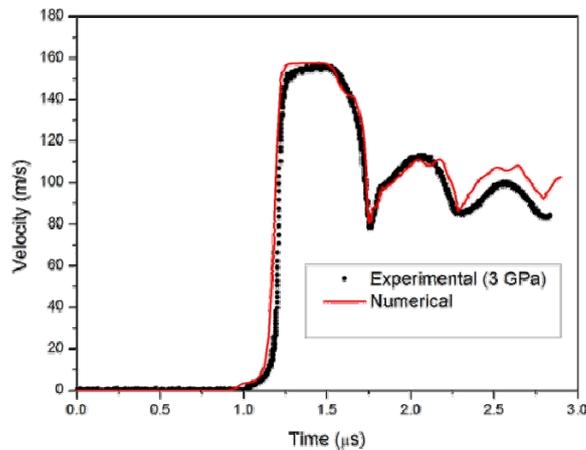


Figura 7: Risultato del processo di calibrazione.



RISULTATI

Utilizzando la legge coesiva calibrata si sono effettuate le simulazioni numeriche delle altre configurazioni per verificare la trasferibilità del modello realizzato. Tutte le analisi, comprese quelle per la calibrazione della legge coesiva i cui risultati sono stati riportati al paragrafo precedente, sono state effettuate con il codice implicito agli elementi finiti MSC.Marc 2007r1. Per risolvere le equazioni del moto del sistema dinamico si è utilizzato, con l'Houbolt Operator, il metodo dell'integrazione diretta, le simulazioni sono state effettuate in regime di deformazione finita, grandi spostamenti ed approccio lagrangiano.

In Fig. 8 è riportato il confronto tra i profili di velocità sperimentali e calcolati per le configurazioni a 3 GPa. Si può notare come il modello sia in grado di prevedere la presenza del segnale di risalita osservato per la configurazione con onda triangolare. Ma ancora più rilevante è il risultato di Fig. 9 che mostra come, mentre per il profilo d'onda quadro c'è la generazione del piano di *spall*, per l'onda triangolare, analogamente a quanto osservato sperimentalmente, si ha solo una zona di consistente danneggiamento, indicato dall'allungamento di alcuni elementi coesivi. Inoltre, lo spessore del frammento, per la configurazione con onda quadra, e la localizzazione della zona danneggiata, per quella con onda triangolare, sono in buon accordo con le misure sperimentali.

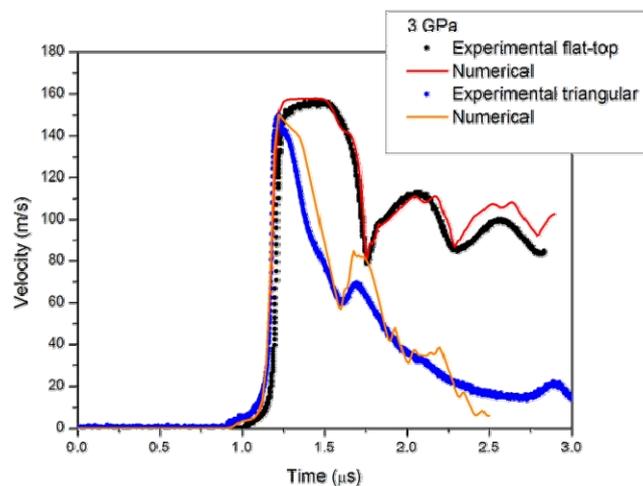


Figura 8: Confronto tra i profili di velocità sperimentali e calcolati per le configurazioni a 3 GPa.

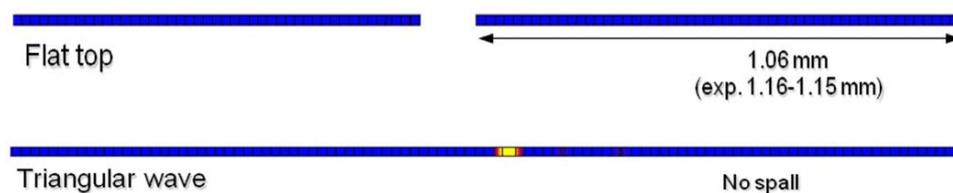


Figura 9: Particolari della deformata delle SSM per le due configurazioni a 3 GPa.

Anche per le configurazioni a 8 GPa, i risultati numerici sono in buon accordo con quelli sperimentali, sia in termini di profili di velocità, Fig. 10, sia per quanto riguarda la distribuzione del danneggiamento lungo lo spessore del disco, Fig. 11. Tuttavia mentre negli esperimenti il *multi-spall* si è generato nella configurazione con onda triangolare, per le simulazioni questo fenomeno si è realizzato per quella con onda quadra. Bisogna però osservare che è sufficiente innalzare leggermente il picco di pressione, Fig. 12, per ottenere la creazione della seconda superficie di separazione anche con onda triangolare e che le dimensioni dei frammenti, Fig. 13, sono comparabili a quelle osservate sperimentalmente. La dimensione del frammento intermedio ottenuto dalla simulazione numerica per l'onda quadra, al contrario, è estremamente ridotta, inferiore a 0.3 mm, e questo è pesantemente danneggiato. Tale risultato potrebbe non essere in contrasto con quanto si può notare in Fig. 14, dove, per la configurazione in oggetto, si possono osservare dei piccoli frammenti parzialmente uniti al piano di *spall*, di dimensioni comparabili a quella calcolata per il ligamento intermedio.

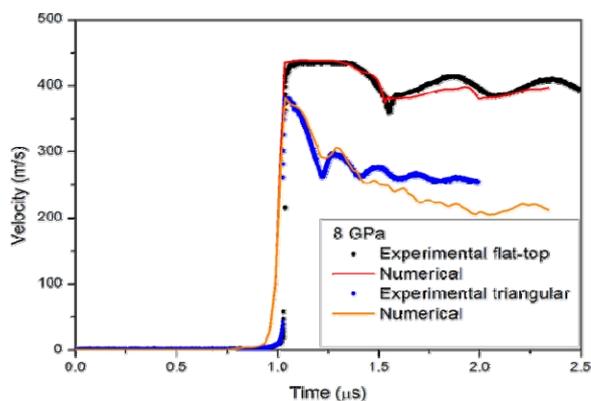


Figura 10: Confronto tra i profili di velocità sperimentali e calcolati per le configurazioni a 8 GPa.

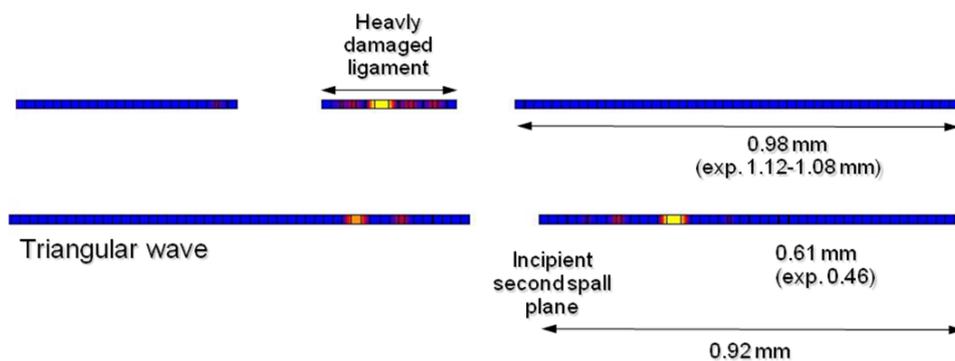


Figura 11: Particolari della deformata delle SSM per le due configurazioni a 8 GPa.

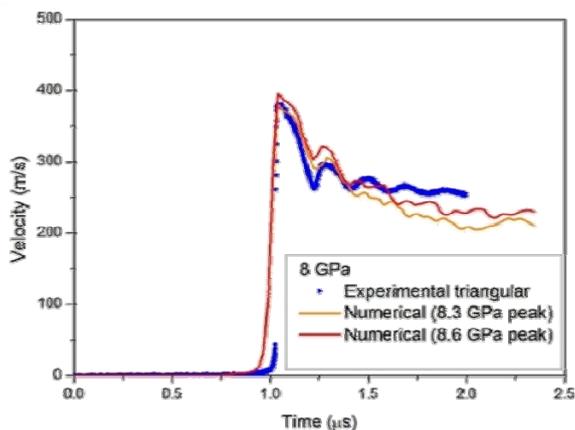


Figura 12: Confronto tra il profilo di velocità sperimentale e quelli calcolati, con una leggera variazione del picco di pressione, per la configurazione a 8 GPa con onda triangolare.

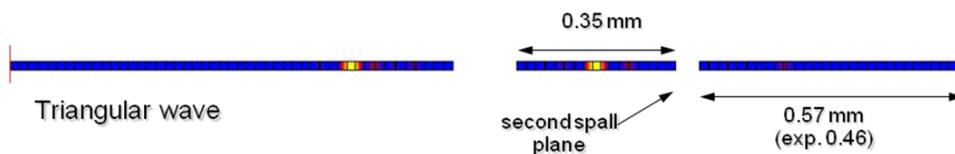


Figura 13: Particolare della deformata del SSM per la configurazioni a 8 GPa con onda triangolare di picco superiore.

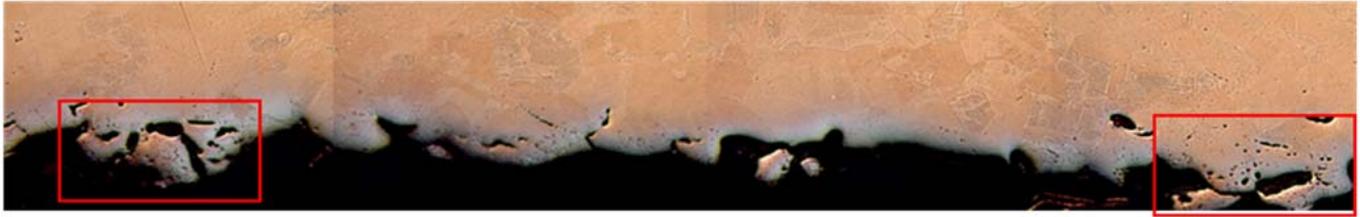


Figura 14: Particolare del piano di *spall* per la configurazione a 8 GPa con onda quadra.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato sviluppato un modello numerico, che utilizza elementi coesivi, in grado di tenere in conto, nel bilancio energetico, le dissipazioni osservate negli esperimenti di impatto planare mirati alla generazione di frattura per *spall*. Il modello riporta con successo alla scala del continuo gli effetti di un micro meccanismo specifico individuato alla mesoscala e legato alla nucleazione di micro vuoti per danneggiamento duttile: una volta calibrato, si è dimostrata la sua trasferibilità a diversi livelli di pressione e a diversi profili di onde di sollecitazione. Per quanto riguarda possibili futuri scenari, innanzi tutto, il modello utilizzato con successo per il rame puro dovrebbe essere testato in applicazioni con differenti materiali, ma soprattutto, si ritiene che esso debba essere considerato solo come il primo passo di un percorso che si dovrebbe completare con la realizzazione di un modello costitutivo alla scala del continuo che incorpori le caratteristiche messe qui in evidenza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. D. Koller, R. S. Hixson, G. T. Gray, III, P. A. Rigg, L. B. Addessio, E. K. Cerreta, J. D. Maestas, C. A. Yablinsky, *Journal of Applied Physics*, 98 (2005) 103518.
- [2] N. Bonora, L. Esposito, A. Ruggiero, *AIP Conference Proceedings*, (2007).
- [3] N. Bonora, *Engineering Fracture Mechanics*, 58 (1997) 11.
- [4] R. Minich, P. Sofronis, *ASC PI Meeting*, Sandia National Laboratories, New Mexico, USA (2005).