



Gli ultrasuoni nel lavaggio industriale (parte 12)



Una panoramica completa, teorica e pratica, sullo "stato dell'arte" di una tecnologia che presenta ancora molti lati sconosciuti e che è caratterizzata da esperienze empiriche a volte controverse

A cura della Redazione

Alcuni studi hanno mostrato che l'entità del danno causato dalla cavitazione (espresso in termini di perdita di peso della superficie) è direttamente proporzionale al quadrato dell'ampiezza della pressione sonora; cioè, in altri termini, della potenza trasmessa.

Ma ciò sembra essere vero fino a che non viene raggiunto un certo valore limite, oltre il quale un ulteriore incremento dell'ampiezza della pressione ha come effetto la riduzione dell'intensità di cavitazione; una possibile spiegazione di tale fenomeno si basa sul fatto che aumentando la potenza, aumentano sia il raggio della bolla, sia il tempo necessario per collassare: se t è di molto superiore al semiperiodo dell'onda $T/2$ (corrispondente al passaggio dal punto di massima pressione negativa a quello di massima pressione positiva, ed entro il quale deve avvenire il collasso affinché l'implosione sia più energetica), allora la bolla si ritrova soggetta alla pressione negativa prima di aver completato l'implosione, che risulta quindi meno intensa.

L'incremento della potenza oltre questo valore potrebbe quindi essere adottato per ridurre gli effetti dannosi dovuti all'intensità di cavitazione.

Un altro metodo per superare questo problema potrebbe essere quello di mantenere un'elevata quantità di gas disciolti nel liquido; infatti, l'eliminazione preventiva di questi gas (processo di degasazione, che verrà analizzato più avanti) porta ad un incremento della soglia di cavitazione (cioè della potenza necessaria a formare le

bolle) e conseguentemente ad una maggiore intensità dell'implosione, mancando l'"effetto cuscino" prodotto dai gas stessi.

In alternativa si può provvedere all'aggiunta di tensioattivi che riducono la tensione superficiale del liquido, riducendo di conseguenza l'intensità di cavitazione anche se, per contro, questi prodotti possono risultare di più difficile rimozione in fase di risciacquo e richiedere temperature più elevate e tempi ciclo più lunghi.

Ma il metodo probabilmente più utilizzato è quello che prevede di scegliere opportunamente la frequenza della perturbazione ultrasonora applicata.

Come si è visto, le bolle che forniscono una minore intensità di cavitazione sono quelle di dimensioni più piccole, prodotte da ultrasuoni ad elevata frequenza di vibrazione; l'innalzamento della frequenza applicata è quindi uno dei più importanti sistemi di controllo dell'erosione da cavitazione. A titolo di esempio, si prenda in considerazione il fatto che nel campo della microelettronica, in cui la pulizia dei wafer di silicio deve essere pressoché totale ed in cui anche il minimo danno superficiale può comprometterne drasticamente le prestazioni, la prevenzione dell'erosione viene normalmente effettuata utilizzando frequenze prossime a 1 MHz.

L'ottimizzazione della frequenza va effettuata anche in funzione del processo di lavaggio adottato. Consideriamo un altro esempio: effettuando un lavaggio a 40 KHz in soluzione acquosa contenente opportuni tensioattivi, l'erosione

può essere evitata; se però il successivo passaggio è un risciacquo, in acqua demineralizzata, con ultrasuoni alla stessa frequenza, il danno da erosione diventa molto più probabile. Ciò è dovuto al fatto che l'acqua demineralizzata, avendo una maggiore purezza ed una maggiore tensione superficiale, è in grado di permettere lo sviluppo di un'intensità di cavitazione assai elevata e perciò potenzialmente dannosa. Aumentando la frequenza degli ultrasuoni nella vasca di risciacquo, si può quindi prevenire il danno.

L'erosione e, più in generale, il danno superficiale provocato dalla presenza di onde stazionarie nella vasca di lavaggio, deriva dal fatto che in queste condizioni la distribuzione delle cavità nel liquido è disuniforme e si determinano zone in cui la cavitazione è sempre assente (nodi) e zone in cui la cavitazione è sempre presente (antinodi); come conseguenza di ciò si ha una riduzione dell'effetto pulente sulla superficie prossima ai nodi ed una possibilità maggiore di erosione sulla parte di superficie esposta alla cavitazione, causata dal maggior tempo di applicazione necessario per compensare la ridotta pulizia dell'altra parte.

Le problematiche connesse con la presenza di onde stazionarie coinvolgono quindi sia l'aspetto delle prestazioni di lavaggio, in maniera principale, sia quello del danneggiamento superficiale, come effetto riflesso.

Le onde stazionarie si formano sempre nella vasca di lavaggio per la presenza inevitabile delle armoniche superiori e come conse-

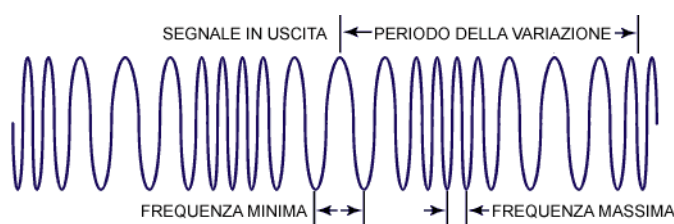
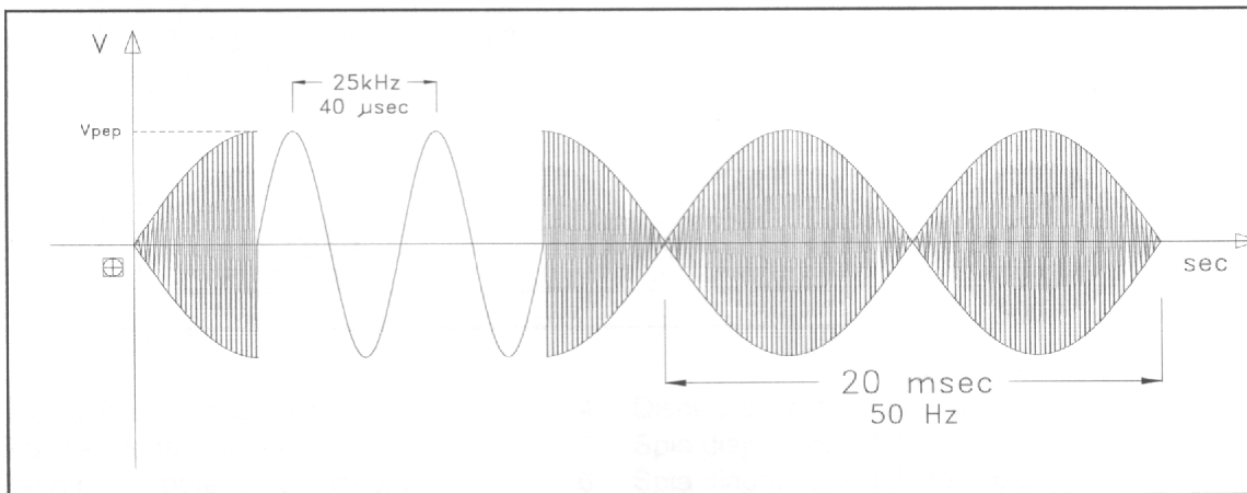


Fig. 41 - Schematizzazione del frequency sweep



Fig. 42 - Modulazione di ampiezza



guenza della riflessione delle onde contro le pareti e contro la superficie libera del liquido a contatto con l'aria; il problema maggiore risiede nel fatto che la dislocazione dei nodi non è prevedibile, in quanto funzione di molte variabili di difficile controllo, e quindi le soluzioni tecniche adottabili per eliminare il fenomeno, o meglio per ridurne gli effetti, non possono essere mirate, ma devono agire in maniera indiretta.

Il danno prodotto è dovuto al fatto che l'onda stazionaria è il risultato dell'interferenza costruttiva di due onde; ciò implica un incremento agli antinodi dell'ampiezza dell'onda risultante (fino al doppio dell'ampiezza dell'onda originaria) e, quindi, un conseguente incremento della potenza acustica in quei punti, cioè un incremento dell'intensità di cavitazione.

Il modo per certi versi più banale per mitigare il danno (sia in termini di lavaggio che in termini di erosione) è quello di ruotare o traslare il pezzo in maniera che, mediamente nel tempo, tutta la superficie venga sottoposta all'azione della cavitazione. Questo metodo prevede ovviamente l'adozione di dispositivi di rototraslazione supplementari, qualora non fossero già presenti per altri motivi (quali l'eliminazione di sacche d'aria da fori ciechi, cavi-

tà, eccetera).

Il metodo che però viene comunemente più utilizzato è quello che prevede di operare la continua variazione della frequenza di lavoro degli ultrasuoni, entro un certo intervallo di valori prossimi alla frequenza di risonanza del trasduttore (Fig. 41).

Tale variazione viene effettuata con un rateo fisso di scansione, cioè con incrementi e decrementi continui di qualche centinaia di Hz. L'applicazione di questa tecnica, denominata "frequency sweep" (scansione della frequenza), di fatto non elimina il fenomeno dell'onda stazionaria, ma sposta con continuità nello spazio la posizione dei nodi, distribuendo più uniformemente la cavitazione e riducendo contemporaneamente il valore dell'ampiezza di picco dell'onda.

Lo sweep della frequenza guida (quella del generatore) permette dunque di riempire le zone morte (nodi) altrimenti presenti tra le onde stazionarie nella vasca. Sorgono però due problemi supplementari:

- come è possibile variare la frequenza operativa, mantenendo però gli stessi benefici della frequenza di risonanza?
- In caso di piccole variazioni, attuate per non scostarsi troppo dalla frequenza di risonanza,

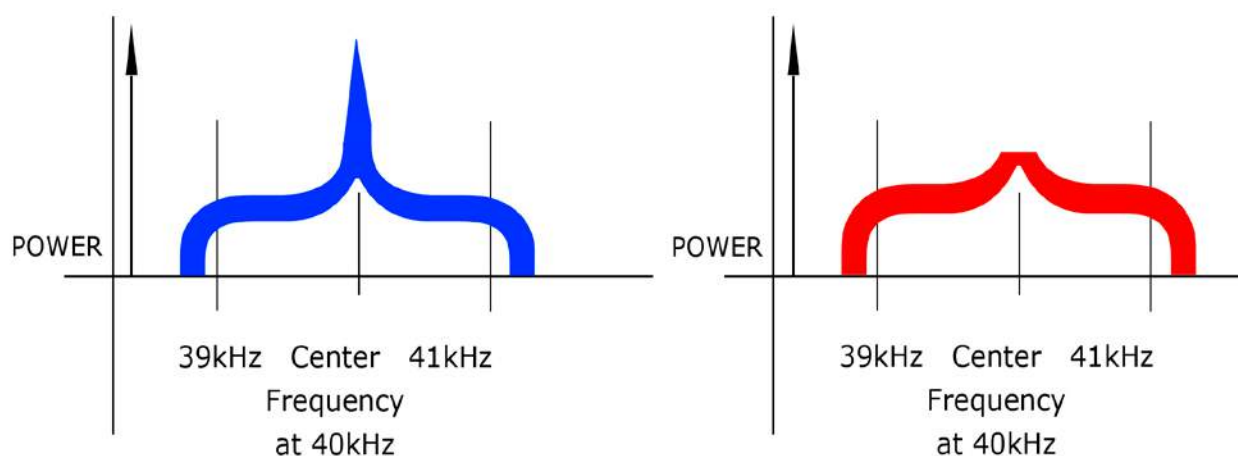
come è possibile riuscire a riempire i nodi?

Alla prima domanda la risposta si basa sul fatto che i trasduttori possiedono normalmente una certa tolleranza rispetto ad una variazione non troppo elevata dalla frequenza di risonanza (1-2 KHz). Per il punto b) occorre fare una breve digressione: i trasduttori si possono distinguere tra quelli a basso Q e quelli ad alto Q, dove Q viene definito come il rapporto tra l'ampiezza di vibrazione alla frequenza di risonanza (A_{f0}) e l'ampiezza di vibrazione ad una qualsiasi altra frequenza (A_f); ($Q = A_{f0}/A_f$).

Nei trasduttori a basso Q, una variazione del 5-10% dalla frequenza di risonanza non riduce significativamente l'ampiezza di picco, mentre in quelli ad alto Q, anche una variazione di poche centinaia di Hz riduce considerevolmente l'ampiezza di picco; in ogni caso, maggiore è la variazione in frequenza (sweep) e maggiore è la riduzione dell'ampiezza media della vibrazione meccanica. E poiché l'ampiezza di picco della vibrazione trasmessa è il parametro che fa superare al sistema la soglia di cavitazione, occorre trovare il giusto compromesso relativamente all'intervallo di variazione dello sweep.

Da ciò segue che i trasduttori a basso Q sono i più indicati per i ge-

Fig. 43 - Potenza di picco in trasduttori non ottimizzati (sinistra) e in trasduttori ottimizzati (destra)



neratori con frequency sweep. Consideriamo ora una variazione di 2 KHz su un sistema che opera ad una frequenza nominale di 40 KHz; ciò significa che la banda di frequenza varia da 38 a 42 KHz ($\pm 5\%$).

In una vasca senza sweep, il fronte d'onda emesso si riflette all'interfaccia aria-liquido, formando zone di massima attività (antinodi) ben definite. Sebbene negli spazi tra gli antinodi non ci sia presenza di attività (cioè di cavitazione), è comunque presente una qualche azione di pulizia all'interno del volume, più pronunciata agli antinodi (sotto la soglia di cavitazione) che altrove, data dalla corrente acustica; quest'ultima non è così vigorosa nell'azione pulente quanto lo è l'implosione delle cavità, ma in taluni casi è l'unica forma di azione pulente.

L'energia ultrasonora, una parte della quale è sufficiente per produrre la cavitazione, raggiunge le regioni tra gli antinodi per vie indirette, quali la riflessione alle pareti della vasca o all'interfaccia aria-liquido o alle superfici dei pezzi da pulire. Da ciò risulta che anche se non si cerca di compensare le differenze in attività tra le regioni degli antinodi, comunque un certo grado di pulizia dei pezzi è possibile ottenerlo, anche se

in modo disuniforme. Il tempo a ciò necessario dipende dai livelli energetici presenti nelle aree di minore attività. Questa condizione è però indesiderabile per due motivi: la durata del ciclo di lavaggio si estenderebbe a livelli inaccettabili; in applicazioni particolari (semiconduttori, ottica di precisione, eccetera) in cui i pezzi possono essere più sensibili ad un'eccessiva esposizione agli ultrasuoni, si possono verificare dei danneggiamenti superficiali in corrispondenza degli antinodi, a causa del maggior tempo richiesto per raggiungere il grado di pulizia voluto nelle altre regioni meno attive.

Applicando lo sweep, i picchi di energia, invece di essere ben definiti e localizzati ad ogni semilunghezza d'onda, vengono smorzati e diffusi su una banda di frequenza tra 38 e 42 KHz; poiché la variazione totale della frequenza è pari al 10% della frequenza operativa, ora le bande di massima attività operativa occupano il 10% del ciclo totale della perturbazione. L'effetto pratico di questa diffusione è che la differenza tra il rateo di rimozione dello sporco agli antinodi e quello nelle altre regioni è ora meno pronunciato e quindi si è in presenza di una migliore distribuzione dell'energia ultrasonora.

Nel caso in cui, invece, non sia ac-

cettabile il danneggiamento prodotto dall'implosione su superfici particolarmente delicate, indipendentemente dal fatto che ciò avvenga o meno agli antinodi, una possibile soluzione è quella di portare al di sotto della soglia di cavitazione l'ampiezza di picco agli antinodi, intervenendo sulla potenza erogata, sull'ampiezza di banda e/o sul frequency sweep. In questo modo può essere mantenuto un elevato livello di attività di pulizia, sopprimendo la cavitazione. Dicendolo in maniera diversa, un'accurata combinazione delle tre variabili citate assicura che, durante la scansione, le onde di rarefazione non siano in grado di provocare la cavitazione o, nel caso contrario, siano in grado di impedire la crescita delle bolle fino alla cavitazione, permettendogli solo di oscillare. Il risultato di ciò è una distribuzione energetica amorfa, sotto forma di corrente acustica e di cavitazione non implodente, che evita i danni alle superfici.

Il concetto comunque applicato è quello della variazione di fase in una situazione a velocità costante; sebbene le onde partano dallo stesso punto e nello stesso modo, nel loro percorso si diffondono e si sovrappongono andando ad uniformare nel tempo l'energia distribuita.



La variazione di frequenza all'interno della banda di sweep prescelta non è continua, ma discreta; il rateo di scansione è generalmente fisso ed impostato dal costruttore, ma in alcuni generatori è presente la possibilità di scegliere tra due ratei (uno maggiore ed uno minore) preimpostati. La variazione può essere effettuata sia in termini di tempo (da una al secondo a centinaia al secondo) che in termini di ampiezza (da qualche Hz a qualche centinaia di Hz).

Un altro sistema che può essere utilizzato per ridurre il fenomeno dell'onda stazionaria è quello di dotare il generatore di un dispositivo regolatore in grado di operare la modulazione della potenza (modulazione di ampiezza); con questo sistema, viene fatta variare con continuità la potenza erogata, all'interno di un certo intervallo. La forma d'onda assume così la configurazione mostrata in Fig. 42: il segnale in frequenza è quello interno, ma lo spettro dell'onda è complesso, essendo presente almeno un'altra frequenza che è quella data dall'involuppo del segnale. La presenza di un'onda complessa è quindi in grado di mitigare la formazione di onde stazionarie.

La regolazione del livello di potenza può anche servire nel caso in cui si operino lavaggi con liquidi differenti, oppure quando cambia la composizione dello sporco; in questi casi un liquido potrebbe cavitare più facilmente di un altro, oppure una tipologia di sporco potrebbe

necessitare di minore energia per essere asportato. La possibilità di regolare la potenza rappresenta quindi una potenziale riduzione dei consumi e comunque un'ottimizzazione della messa a punto del sistema. Occorre però tenere presente che l'utilizzo di tale possibilità deve essere effettuato in maniera accorta, per evitare di scendere al di sotto della soglia di cavitazione del liquido.

Un'ultima considerazione sulle onde stazionarie è la seguente: poiché l'unità radiante non si può considerare come un pistone ideale, ogni punto del quale si muove uniformemente con gli altri punti (cioè non è perfettamente planare) ma, conseguentemente a cause varie, è soggetta a microscopiche flessioni (dell'eliminazione di quelle macroscopiche si è già parlato altrove), ogni punto dell'unità emette un'onda sfasata rispetto alle altre; tali sfasamenti fanno sì che la perturbazione complessivamente emessa assuma forme particolari che di fatto riducono involontariamente il fenomeno dell'onda stazionaria. L'utilizzo della tecnica del frequency sweep, in parallelo con l'applicazione di trasduttori progettati per avere un'impedenza pressoché uniforme su tutto l'intervallo di scansione, fornisce anche una buona soluzione tecnica al problema del danno da risonanza (rottura, frattura, eccetera) che si può produrre: quando una parte più o meno piccola del pezzo da pulire inizia a vibrare con la stessa frequenza della

perturbazione a cui è sottoposta (in questi casi si dice che il pezzo è entrato in risonanza con l'onda trasmessa: risonanza ad alta frequenza); oppure quando si vengono a formare delle onde sonore a bassa frequenza (comprese tra 200 Hz e 2 KHz), causate dall'errata progettazione dei trasduttori ad impedenza uniforme (risonanza a bassa frequenza).

Una soluzione a quest'ultimo problema, adottata con successo da alcuni produttori di dispositivi ad ultrasuoni, è l'introduzione della tecnica del "dual sweep", che consiste nell'operare la modulazione della scansione della frequenza, in modo che questa non abbia un rateo fisso, causa prima delle onde a bassa frequenza.

Il risultato di questa tecnica è la generazione di una particolare forma d'onda, controllata da apposito processore, in grado di eliminare le basse frequenze di risonanza.

Nei trasduttori non ottimizzati, durante lo sweep semplice si può produrre un picco di potenza alla frequenza fondamentale (Fig. 42), in grado di produrre componenti sonore a bassa frequenza le quali, a loro volta, possono produrre risonanza e conseguente danneggiamento dei pezzi trattati (soprattutto se delicati).

Nel dual sweep invece, essendo continua la modulazione della frequenza, gli effetti secondari sopra descritti vengono eliminati.

INDICE DELLE PUNTATE PRECEDENTI:

- I) Introduzione e "stato dell'arte"
- II) Cenni di acustica
- III) Gli ultrasuoni
- IV) I trasduttori magnetostrittivi
- V) I trasduttori piezoelettrici (1)

- VI) I trasduttori piezoelettrici (2)
- VII) I trasduttori piezoelettrici (3)
- VIII) Il generatore
- IX) La cavitazione (1)
- X) La cavitazione (2)
- XI) Ottimizzazione del lavaggio