

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE FACOLTA' DI INGEGNERIA CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

STUDIO DELL'EFFETTO PORTEVIN LE CHATELIER IN LEGHE DI ALLUMINIO TRAMITE DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)

STUDY OF PORTEVIN LE CHATELIER EFFECT IN ALUMINUM ALLOYS THROUGH DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)

Relatore: **PROF. MARCO ROSSI**

Candidato: GIOVANNI LATINI

ANNO ACCADEMICO 2019 / 2020

INDICE

Elenco delle figure	
Sommario	5
Abstract	6
Capitolo 1: Leghe di alluminio e prove di trazione	7
1.1 Introduzione	7
1.2 Caratteristiche dell'alluminio	7
1.3 Leghe di alluminio	9
1.3.1 Elementi in lega	9
1.3.2 Classificazione e nomenclatura	
1.4 Generalità sulla prova di trazione	
1.4.1 Grafici tensione - deformazione	14
1.4.2 Tensione e deformazione equivalente	17
Capitolo 2: Effetto Portevin – Le Chatelier	
2.1 Introduzione	
2.2 Jerky flow nel grafico tensione - deformazione	
2.3 Tipologie di bande plastiche di scorrimento	20
2.4 Dynamic Strain Aging (DSA)	
2.4.1 Alluminio elemento chimico	
2.4.2 Reticolo cristallino	23
2.4.3 Difetti del reticolo: dislocazioni	24
2.4.4 Dynamic Strain Aging	25
2.5 Strain Rate Sensivity (SRS)	

Capitolo 3: Analisi sperimentale dell'effetto PLC	28
3.1 Digital Image Correlation (DIC)	28
3.2 Configurazione e setup del sistema	29
3.3 Principio di funzionamento	30
3.4 Parametri fondamentali dell'analisi DIC	31
3.4.1 Pattern	32
3.4.2 Region of interest (ROI)	32
3.4.3 Subset size	33
3.4.4 Step size	33
3.4.3 Strain window	34
3.5 Analisi della deformazione al variare dei parametri DIC	34
Conclusioni	49
Bibliografia	51

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: esempi di applicazioni dell'alluminio	9
Figura 2: effetto dei principali elementi di lega	9
Figura 3: esempi di macchine per la prova di trazione	14
Figura 4: curva tensione-deformazione nominale (o ingegneristica)	15
Figura 5: confronto curva tensione-deformazione reale e ingegneristica	16
Figura 6: esempio di bande di scorrimento visibili in seguito a deformazione plastica	19
Figura 7: curva tensione – deformazione in diverse leghe Al-Mg a temperatura ambiente	20
Figura 8: tipologie di bande plastiche di scorrimento caratteristiche dell'effetto PLC	21
Figura 9: atomo di alluminio	22
Figura 10: cella cubica a facce centrate (CFC)	23
Figura 11: dislocazioni a spigolo e a vite	24
Figura 12: spiegazione grafica del fenomeno DSA	25
Figura 13: curve tensione-deformazione al variare della velocità di deformazione è	26
Figura 14: andamento teorico della tensione al variare di È in un materiale con effetto PLC	27
Figura 15: setup del sistema utilizzato per l'analisi DIC	29
Figura 16: tracking del subset intorno al marker di riferimento	31
Figura 17: esempio di speckle pattern utilizzato nell'analisi DIC	32
Figura 18: scelta della "region of interest" in un provino sottoposto a trazione	32
Figura 19: variazione dell'errore di misura nell'analisi DIC al variare della subset size	33
Figura 20: esempio di alcuni possibili valori di step size ammissibili	34
Figura 21: frame iniziali utilizzati nella nostra analisi DIC	35
Figura 22: tabella riassuntiva con i parametri scelti nelle analisi fatte	36
Figura 23: mappe di deformazione (subset size 31, step size 15, strain window 15)	37
Figura 24: mappe di deformazione (subset size 31, step size 15, strain window 3)	38
Figura 25: mappe di deformazione (subset size 31, step size 3, strain window 15)	39
Figura 26: mappe di deformazione (subset size 31, step size 3, strain window 3)	40
Figura 27: mappe di deformazione (subset size 15, step size 7, strain window 15)	41
Figura 28: mappe di deformazione (subset size 15, step size 7, strain window 3)	42
Figura 29: mappe di deformazione (subset size 7, step size 3, strain window 15)	43
Figura 30: mappe di deformazione (subset size 7, step size 3, strain window 3)	44
Figura 31: mappe di deformazione (subset size 3, step size 3, strain window 15)	45
Figura 32: mappe di deformazione (subset size 3, step size 3, strain window 3)	46
Figura 33: confronto della deformazione nei vari casi per uno stesso frame (time 125)	47

SOMMARIO

L'effetto Portevin le Chatelier (PLC) è un fenomeno che si verifica su leghe di acciaio e leghe di alluminio quando vengono sottoposte ad una deformazione plastica di trazione, causando zone di deformazione disomogenea che si ripetono lungo il materiale e la fluttuazione della curva tensionedeformazione dopo aver superato il limite di snervamento, che assume così la caratteristica forma a denti di sega.

Questo effetto è dannoso non solo in quanto causa problematiche dal punto di vista estetico al materiale che viene deformato, ma comporta anche problemi strutturali con una notevole diminuzione delle proprietà meccaniche.

Il primo a osservare questa caratteristica di alcuni materiali metallici è stato Portevin Le Chatelier, nel 1909, da cui infatti prende il nome tale effetto.

Ad oggi non è ancora presente una spiegazione univoca e globalmente accettata e verificata al fenomeno, quella attualmente più accreditata ne attribuisce la causa all'interazione tra il movimento delle dislocazioni e la diffusione di atomi di soluto. Questa teoria è conosciuta come invecchiamento dinamico DAS (Dynamic Strain Aging), di cui si parlerà più approfonditamente nei capitoli successivi.

In questo elaborato viene studiato l'effetto Portevin Le Chatelier mediante prove di trazione su provini in lega d'alluminio della serie 5000, lega di particolare interesse e usata per via della sua economicità e delle sue discrete proprietà meccaniche. Inizialmente si forniscono alcune generalità riguardo alle leghe di alluminio, prove di trazione e si spiega più nel dettaglio il fenomeno mostrando le principali teorie che ne sono alla base. Successivamente entriamo in quella che è la vera e propria analisi sperimentale; verrà introdotto in particolare il metodo DIC (Digital Image Correlation), uno delle più diffuse tecniche di misurazione di spostamenti e deformazioni in una prova di trazione monoassiale.

Spiegato il funzionamento del metodo, tutta l'attrezzatura che lo compone e i suoi parametri più significativi, andremo a focalizzare la nostra attenzione sulle mappe di deformazione del provino per una prova di trazione con una velocità di deformazione impostata (nel nostro caso di 3 mm/s).

Tali mappe sono elaborate da un determinato software DIC, più specificatamente MatchID nel nostro caso. La procedura si articola in più fasi: in primis occorre inserire l'immagine del provino indeformato (prima di iniziare la prova) e delle successive, quando il provino inizia la sua deformazione (sono ottenute mediante delle fotografie sottoforma di frame).

Fatto questo occorre impostare i parametri caratteristici della prova, che vedremo in dettaglio in seguito. Ed è proprio qui che sarà rivolta la nostra analisi: in particolare il nostro scopo sarà i vedere come si modificano le mappe di deformazione al variare di ciascuno di questi parametri, e riuscire a vedere dalle diverse mappe le bande di scorrimento tipiche dell'effetto PLC.

ABSTRACT

The Portevin Le Chatelier effect is a phenomenon that occurs in steel and aluminium alloys when they are by a plastic deformation, causing a zone of heterogeneous deformation that are repeated along the material and a fluctuation of the tension-deformation curve in the plastic zone with the characteristic shape of "saw teeth".

This effect is dangerous because of aesthetic problem for the material deformed and also because of it involves structural problems with a considerable decrease in mechanical properties. The first who noticed this effect was Portevin Le Chatelier, from which this effect takes its name. Nowadays there isn't an univocal ad verified explanation for the phenomenon yet, the most credited is the Dynamic Strain Aging (DSA), that attributes the cause to an interaction between the movement of dislocations and the spread of solute atoms.

In this work, we analyse the Portevin Le Chatelier effect on tensile tests, made in aluminium alloys from the series 5000, alloy of particular interest for its cheapness and for his discrete mechanical properties. Initially we describe some general information about aluminium alloys, tensile tests and the phenomenon is explained in more detail showing the main theories underlying it. Subsequently we enter into what is the real experimental analysis. In particular, the DIC (Digital Image Correlation) method will be introduced, one of the most widespread techniques for measuring displacements and deformations in a uniaxial tensile test.

After we explain the operation of the method, all the equipment that composes it and its most significant parameters, we will focus our attention on the deformation maps of the specimen for a tensile test with a set deformation rate (in our case of 3 mm / s).

A specific DIC software, more specifically MatchID in our case, processes these maps. The procedure includes several phases: first, it is necessary to insert the image of the starter specimen (before starting the test) and the subsequent ones, when the specimen begins its deformation (obtained by means of photographs in the form of frames).

After this, it is necessary to set the characteristic parameters of the test, which we will see in detail later. Moreover, it is precisely here that our analysis will be focus: in particular, our aim will be to see how the deformation maps change as each of these parameters varies, and to be able to see the sliding bands typical of the PLC effect from the different maps.

CAPITOLO 1: LEGHE DI ALLUMINIO E PROVE DI TRAZIONE

1.1 Introduzione

L'alluminio è di gran lunga il più giovane tra i metalli di uso industriale, essendo stato prodotto su larga scala industriale poco più di 100 anni fa. La scoperta dell'alluminio risale al 1807 quando il chimico inglese Sir Humphrey Davy riuscì a identificarlo come elemento, ma non fu in grado di ottenerlo: infatti il suo tentativo di ottenere l'alluminio attraverso un processo di elettrolisi di una soluzione di ossido di alluminio e potassa non diede esito positivo.

Solo nel 1825 il fisico danese H.C. Oersted riuscì a produrre alcune gocce di alluminio, tramite l'applicazione di una fonte di calore ad un amalgama di potassio e alluminio. Le ricerche furono proseguite in Germania da un suo discepolo, Freidirich Wohler, che dimostrò molte delle proprietà del metallo, non ultima la sua leggerezza. Fu proprio questa scoperta ad animare il mondo scientifico e ad attrarre maggiori fondi per la ricerca.

Nel 1854, il francese Henri Sainte-Claire Deville sviluppò un complesso processo termo-chimico, ovvero un metodo di riduzione diretta del metallo, che permetteva una limitata produzione industriale. Tuttavia il processo, diffuso in tutta Europa, era estremamente costoso e rendeva il metallo addirittura più caro dell'oro. Nonostante i miglioramenti conseguiti nel tempo, il metodo usato fino ad allora non consentiva la produzione a carattere industriale.

Occorre arrivare al 1886 perché l'americano Charles Martin Hall e il giovane scienziato francese Paul Heroult, scoprissero contemporaneamente, seppur in modo indipendente, il primo processo di fusione elettrolitica per la produzione di alluminio metallico dall'allumina. Il loro metodo consentì la produzione di elevati quantitativi di alluminio a basso costo dati anche gli enormi progressi avvenuti nella produzione di energia elettrica dovuti alle moderne dinamo. Il metodo di Hall – Heroult, è ancora oggi il sistema utilizzato per la produzione di alluminio ed è stato migliorato dalle successive scoperte, quale quella dell'austriaco Karl Bayer, che nel 1888 brevettò la tecnica per l'estrazione dell'ossido di alluminio dalla bauxite.

Ad oggi l'alluminio è il terzo elemento più comune nella crosta terrestre. Esso si può produrre a partire: dal minerale, la bauxite oppure dalla rifusione del metallo stesso, ovvero dal riciclo dei rottami di alluminio. L'alluminio prodotto a partire dal minerale è detto alluminio primario, quello ottenuto dalla rifusione dei rottami di alluminio, riciclato o secondario. La bauxite infatti è un minerale molto comune e diffuso in tutto il mondo, di colore rosso scuro che può contenere fino al 40-50% di alluminio. I principali giacimenti di bauxite si trovano in Australia, Cina, Russia, Africa, Stati Uniti e in Europa nella penisola balcanica.

1.2 Caratteristiche dell'alluminio

Nonostante la scoperta e le prime applicazioni siano molto recenti, ovvero solamente dagli ultimi due secoli, l'alluminio è oggi uno dei materiali più comunemente utilizzati. Infatti esso possiede delle ottime proprietà e caratteristiche che lo fanno preferire rispetto ad altri materiali; vediamo di elencare le sue più importanti proprietà:

- leggerezza: l'alluminio ha un basso peso specifico (2,7 g/cm³) e questo lo rende interessante nel campo dei trasporti (soprattutto nel settore aerospaziale dove la riduzione dei pesi è fondamentale)
- elevata conducibilità termica ed elettrica: l'alluminio conduce calore ed elettricità in modo eccellente; la sua conduttività termica è di circa il 50/60% di quella del rame, il che lo rende molto appetibile nel campo dei conduttori elettrici (es. i cavi dell'alta tensione)
- resistenza alla corrosione: l'alluminio si ossida immediatamente a contatto con l'aria creando una protezione superficiale che lo rende resistente all'acqua e ad alcune sostanze chimiche.
- bassa temperatura di fusione (660°C): per questo è facilmente colabile, anche in forme permanenti, e grazie a ciò ne vengono accresciute le proprietà meccaniche e le caratteristiche dei getti da fonderia
- resistenza meccanica: le leghe di alluminio possono raggiungere resistenze meccaniche fino a oltre 560 Mpa; il limite di snervamento per le leghe di più elevata resistenza è di circa l'85% della resistenza a rottura; ciò permettere di risolvere la maggior parte dei problemi in numerosissime applicazioni. La resistenza meccanica aumenta alle basse temperature, senza che si evidenzino fenomeni di transizione duttile/fragile
- formabilità: il prodotto estruso/laminato si può produrre in una vastissima serie di forme (profili standard e a disegno, estrusi e trafilati, etc.), in funzione delle svariate esigenze
- *lavorabilità:* l'ottima truciolabilità (ossia l'attitudine a subire lavorazioni con asportazione di truciolo) consente un a facilità di lavorazione dello stesso metallo
- *plasticità:* la proprietà di deformarsi permanentemente, che caratterizza varie leghe di alluminio, ne agevola l'impiego anche in applicazioni complesse
- resilienza: le leghe di alluminio combinano resistenza elevata ed elevata capacità di deformarsi elasticamente sotto carico, ritornando alla forma iniziale una dopo l'urto o dopo che è stato rimosso il carico applicato
- riciclabilità: i materiali a base alluminio possono essere riciclati indefinitamente senza perdere le caratteristiche superiori del metallo, e i loro rottami conservano un valore elevato; ciò ne fa articoli estremamente interessanti dal punto di vista sia dell'impatto ambientale che economico
- resistenza al fuoco e alla basse temperature: i prodotti in alluminio e leghe non bruciano e non producono fumi tossici anche alle temperature più elevate; inoltre, la resistenza meccanica aumenta alle basse temperature senza significativi fenomeni di fragilizzazione; ciò fa delle leghe di alluminio materiali ideali per le applicazioni criogeniche, e comunque per applicazioni a temperature estremamente basse



Figura 1: esempi di applicazioni dell'alluminio

1.3 Leghe di alluminio

Le proprietà meccaniche dell'alluminio puro, allo stato ricotto, sono piuttosto scarse: per esempio il carico unitario di rottura varia intorno a 60/100 Mpa. Proprio a causa delle sue mediocri proprietà meccaniche, gli impieghi industriali dell'alluminio puro sono ridotti a pochi casi particolari che si riferiscono alla realizzazione di conduttori elettrici, fogli per la conservazione di alimenti, alla fabbricazione di impianti chimici, scambiatori di calore, conduttori e condensatori elettrici, ...

Per migliorare le sue proprietà, in particolare la sua resistenza meccanica, esistono due modi:

1) effettuano delle lavorazioni meccaniche a freddo, che portano al fenomeno dell'incrudimento del materiale con conseguente aumento delle proprietà

2) combinando l'alluminio con altri elementi, creando cioè una lega

1.3.1 Elementi di lega

I principali elementi di alligazione utilizzati nelle leghe commerciali sono il rame, il manganese, il silicio, lo zinco, il magnesio e lo zinco; gli effetti di tali elementi sulle proprietà dell'alluminio sono elencati sinteticamente in figura 2.

	Cu	Mn	Si	Mg	Zn
proprietà meccaniche	↑	≜	≜	≜	↑
deformabilità a freddo	↓	≜	¥		↓
resistenza a corrosione	↓	≜	=	↑	=
saldabilità	↓	Ť	=	↑	↓

Figura 2: effetto dei principali elementi di lega sulla resistenza meccanica, sulla deformabilità a freddo, sulla resistenza alla corrosione e sulla saldabilità dell'alluminio puro (\uparrow migliora; \downarrow peggiora; = rimane invariata)

Per la scarsa resistenza meccanica è poco usato allo stato puro. Viene usato in lega con altri elementi: rame, silicio, magnesio, zinco che ne migliorano le proprietà. Ora analizziamo, come già in parte anticipato dalla figura 2, gli effetti di ciascuno dei più comuni alliganti dell'alluminio sulla lega stessa (in particolare sulle proprietà meccaniche):

• *RAME: il* rame forma con l'alluminio una lega con parziale solubilità allo stato solido che può dar luogo alla precipitazioni di seconde fasi coerenti o incoerenti (invecchiamento naturale o artificiale). Aumenta la resistenza meccanica a freddo e a caldo delle leghe all'aumentare della

sua concentrazione (che può raggiungere il 12%). Inoltre la sua aggiunta aumenta il peso specifico, riduce il coefficiente di dilatazione termica, la conducibilità termica ed elettrica e peggiora nettamente la resistenza alla corrosione.

- *MANGANESE:* non precipita fasi intermedie per cui non dà luogo a leghe indurenti per precipitazione (a differenza del rame). Conferisce all'alluminio maggiori caratteristiche meccaniche, mantenendo buona resistenza alla corrosione, buona lavorabilità, elevata plasticità ed ottima saldabilità.
- *MAGNESIO:* presenta una notevole solubilità nell'Alluminio ed è ancora rilevante a temperatura ambiente. Per questo motivo esso è un alligante fra i più impiegati. Aumenta la resistenza meccanica e la durezza. Migliora la lavorabilità alle macchine utensili, la duttilità e la resistenza alla corrosione. Aumenta il ritiro dei getti.
- *SILICIO:* l'effetto principale del silicio sulle leghe di Al è il miglioramento nella fabbricazione dei getti. Migliora la fluidità, ma diminuisce la contrazione di volume associata alla solidificazione. Elimina la fragilità a caldo, abbassa il peso specifico, il coefficiente di dilatazione termica e diminuisce la conducibilità termica. La resistenza alla corrosione atmosferica è migliore rispetto a quella delle leghe Al-Cu, ma inferiore alle leghe Al-Mg.
- *ZINCO:* aumenta la resistenza meccanica, la deformabilità e anche la fragilità a caldo. Un effetto contrapposto, che potrebbe portare a dei problemi, è una forte diminuzione della resistenza alla corrosione. Inoltre ha la proprietà di rendere la lega autotemprante.

1.3.2 Classificazione e nomenclatura

La prima distinzione da effettuare è basata sul processo tecnologico e ci permette di suddividere le leghe di alluminio in:

- leghe da deformazione plastica, utilizzate per la realizzazione di prodotti mediante deformazione a freddo e/o a caldo come laminazione, estrusione, forgiatura, ecc....
- leghe da fonderia, utilizzate per la produzione di getti ottenuti dalla solidificazione della lega fusa all'interno di stampi.

In entrambe le due famiglie, in base alle caratteristiche metallurgiche, è presente un'ulteriore classificazione in base ai metodi effettuati per migliorarne le proprietà meccaniche:

- leghe da trattamento termico (precipitazione delle seconde fasi indurenti)
- leghe da incrudimento (indurimento per deformazione plastica)

Per definire una lega e descrivere le sue proprietà devono poi essere specificate la sua composizione e il suo stato di trattamento termico. Queste informazioni sono fornite da dei sistemi standard di classificazione, sia per la composizione sia per lo stato di trattamento termico.

In generale molto diffusa è la classificazione secondo il metodo internazionale Alluminium Association-AA- (USA), che prevede un sistema di quattro cifre:

- la prima cifra indica l'elemento principale di lega

- la seconda cifra corrisponde a zero se la lega contiene elementi conformi alla propria famiglia di appartenenza, mentre è diversa da zero se vi sono varianti rispetto alla lega base
- la terza e la quarta cifra per l'alluminio non legato (serie 1xxx) indicano la percentuale minima di alluminio; il numero si riferisce alle cifre decimali, ad esempio 1050 indica alluminio puro al 99.50%; per le leghe d'alluminio invece indicano un numero progressivo che definisce in modo univoco la lega all'interno della famiglia a cui appartiene.

Descriveremo ora le principali leghe da deformazione plastica, che sono quelle più importanti. In particolare ora vediamo i vari tipi di leghe di alluminio esistenti (caratterizzate dalla prima cifra):

↓ 1xxx – alluminio con purezza minima del 99,00%

Prodotti di laminazione in alluminio di vario titolo, in funzione delle diverse percentuali di Fe e Si presenti (dallo 0,001 a 1,0% considerati impurezze). La mancanza di alliganti accentua le proprietà specifiche dell'alluminio e cioè la resistenza alla corrosione, il potere riflettente, l'attitudine all'anodizzazione, la conducibilità termica ed elettrica, la plasticità e la deformabilità. Tuttavia le caratteristiche meccaniche sono piuttosto basse (70-180 MPa); per migliorarle l'unico metodo possibile è l'incrudimento, che però ne riduce la duttilità.

↓ 2xxx – leghe alluminio-rame

Il principale elemento di lega è il rame; in alcune leghe vi sono aggiunte di magnesio e manganese. Si tratta di leghe da trattamento termico (richiedono un trattamento di solubilizzazione, tempra ed invecchiamento per sviluppare i valori meccanici di impiego); dopo trattamento termico sviluppano caratteristiche meccaniche confrontabili con quelle degli acciai al carbonio. La loro resistenza alla corrosione è meno elevata di quella di altre leghe di alluminio; per questo motivo in applicazioni critiche richiedono opportuni sistemi di protezione. Vengono utilizzate per parti e strutture che richiedono elevati rapporti resistenza/peso (ruote di velivoli e mezzi di trasporto terrestre, strutture aeronautiche, sospensioni automobilistiche) per temperature di impiego fino a circa 150 °C. Sono caratterizzate da eccellente lavorabilità alle macchine utensili e (tranne la lega 2219) da limitata saldabilità per fusione. Con l'aggiunta di elementi quali Mg, Mn, Si, Ni, Li, esse vengono usate spesso per applicazioni strutturali sugli aerei e in generale dove occorrono buone caratteristiche meccaniche e leggerezza.

Il principale elemento in lega è il manganese, che può raggiunge quantità intorno al 1,25%. In generale il vantaggio conferito dal manganese è quello di aumentare la resistenza meccanica delle leghe lavorate (fino a 300 MPa) e di ridurre la sensibilità alla corrosione intergranulare ed alla stress corrosion, ma l'eventuale presenza di composti intermetallici causa una diminuzione di duttilità. La loro bassa resistenza meccanica le rende utili nel campo degli imballaggi, come ad esempio la produzione delle lattine, ma non in ambito strutturale.

Il principale elemento di lega è il silicio; la sua importanza è dovuta all'aumento di fluidità e alla riduzione del coefficiente di dilatazione termica conferito dall'aggiunta di piccole quantità di questo alligante, proprietà molto utile nella tecnologia dei getti e nelle saldature. La durezza delle particelle di silicio conferisce infine una buona resistenza all'usura. Nell'uso commerciale a questo sistema vengono aggiunti altri elementi in lega quali per esempio il rame e il magnesio.

Il principale elemento di lega è il magnesio, che conferisce doti particolari di resistenza alla corrosione, oltre a buona resistenza a caldo ed ottime doti di duttilità e lavorabilità. In genere non richiede trattamento termico di invecchiamento e presentano buona saldabilità per fusione. Il magnesio mostra una buona solubilità nell'alluminio (seconda solo allo zinco) e, per questo, leghe con concentrazioni minori del 7% non mostrano una apprezzabile precipitazione, ma è possibile comunque ottenere un discreto effetto indurente tramite la lavorazione a freddo, visto che il magnesio permette di conservare un'ottima duttilità; infatti si tratta di leghe da incrudimento le cui caratteristiche meccaniche possono essere aumentate mediante laminazione a freddo, mentre non si possono aumentare mediante trattamento termico. Queste leghe sono, tra le non trattabili termicamente, quelle che hanno resistenza meccanica migliore (da 120 a 450 MPa); possiedono inoltre un'eccellente resistenza alla corrosione e una buona saldabilità: queste caratteristiche vengono sfruttate nella costruzione delle carrozzerie in alluminio.

4 6xxx – leghe alluminio-magnesio-silicio

I principali elementi di lega sono Silicio e Magnesio. Si tratta di leghe da trattamento termico; dopo trattamento termico sviluppano caratteristiche meccaniche intermedie, in generali inferiori a quelle delle leghe della serie 2000. Presentano buona formabilità, lavorabilità, truciolabilità, saldabilità e resistenza alla corrosione. Vengono utilizzate per applicazioni architettoniche, telai motociclistici e ciclistici, strutture saldate in genere. Questo sistema costituisce la classe principale di leghe per i pezzi lavorati a caldo e per quelli ricavati da fusione.

4 7xxx – leghe alluminio-zinco

Il principale elemento di lega è lo zinco, l'elemento che ha la solubilità più elevata nell'alluminio. Generalmente le leghe binarie Al-Zn non vengono usate, ma vengono preferite leghe Al-Zn-Mg. Si tratta di leghe da trattamento termico; queste leghe sviluppano le caratteristiche meccaniche più elevate tra le leghe d'alluminio (possono raggiungere livelli di carico di rottura di circa 700MPa); lo zinco aumenta la resistenza e la durezza, oltre a favorire l'autotemprabilità della lega. Le leghe Al-Zn-Mg, trattate termicamente, hanno la più elevata resistenza a trazione di tutte le leghe di alluminio. Le leghe con le caratteristiche meccaniche più elevate possono presentare sensibilità a tensocorrosione; per questo motivo sono stati sviluppati trattamenti "stabilizzanti" specifici. Presentano buona lavorabilità alle macchine utensili e, nella maggior parte dei casi, scarsa saldabilità per fusione. Vengono utilizzate per strutture aeronautiche e di mezzi di trasporto, ed in generale per parti molto sollecitate (es. cerchi in lega).

🖊 8xxx – leghe alluminio con altri elementi

Questa serie non ha un elemento di lega specifico; infatti utilizziamo questa designazione quando l'elemento di alligazione non è comune come nel caso di ferro, nichel o litio. In particolare, l'elemento più usato per questa serie è il litio, dato che riduce il peso specifico, rendendo quindi tali leghe ottime nel campo aerospaziale. Tuttavia sono molto difficili da produrre e da deformare, oltre a possedere un costo molto elevato.

↓ 9*xxx* – serie sperimentale

Sono leghe sperimentali, quindi ancora in fase di studio.

Dalla classificazione appena fatta, si evince che le leghe delle serie 2xxx,6xxx,7xxx e 8xxx possono subire dei trattamenti aggiuntivi per aumentarne le proprietà. Per semplificare e rendere chiara la nomenclatura al fine di specificare ciascuna lega, il sistema numerico di classificazione prevede una lettera (posta a seguito della designazione numerica) ad indicare lo stato di fornitura del materiale:

- F = grezzo di lavorazione: indica la lega così come esce dalla linea di produzione, senza particolari controlli delle proprietà finali
- O = completamente ricotto: permette di ottenere il valore di durezza minimo previsto per un determinato tipo di lega, cioè dà alla lega stessa un alto grado di addolcimento
- H = incrudito: avviene per deformazione al termine della ricottura. Nella designazione è previsto anche l'utilizzo di una seconda cifra, compresa fra 1 e 9, che indica il grado di incrudimento, il quale aumenta al crescere del valore della cifra stessa e, se necessario, anche di una terza cifra, necessaria per specificare eventuali varianti rispetto a quelle che ora elencheremo:
- H1 = solo incrudito: non è previsto alcun ciclo termico supplementare
- H2 = incrudito e parzialmente ricotto: al fine di raggiungere il livello desiderato di resistenza meccanica
- H3 = incrudito e stabilizzato: il trattamento termico di stabilizzazione (anche detto ricottura di stabilizzazione) consiste nel riscaldamento ad una temperatura di circa 250°C per un certo tempo e al successivo raffreddamento in aria; esso consente di limitare il fenomeno della dilatazione permanente
- H4 = incrudito e verniciato/laccato
- W = con tempra di soluzione: cioè leghe temprate per soluzione; tuttavia questa soluzione è instabile, in quanto la lega tende ad invecchiare
- T = temprato e invecchiato: portato alla temperatura di solubilizzazione e successivamente temprato e invecchiato (naturalmente o artificialmente) fino ad ottenere la microstruttura desiderata al fine di incrementare le proprietà meccaniche. Questa lettera è seguita da una cifra che indica lo specifico tipo di invecchiamento:
 - T1 tempra in aria e invecchiamento naturale
 - T2 tempra in aria, incrudimento e invecchiamento
 - o T3 tempra, incrudimento e invecchiamento naturale
 - T4 tempra e invecchiamento naturale
 - T5 tempra in aria e invecchiamento artificiale
 - T6 tempre e invecchiamento artificiale
 - T7 tempra e stabilizzazione
 - o T8 tempra, incrudimento e invecchiamento artificiale
 - o T9 tempra, invecchiamento artificiale e incrudimento
 - o T10 tempra in aria, incrudimento e invecchiamento artificiale

1.4 Generalità sulla prova di trazione

La prova di trazione è la più importante tra le prove meccaniche distruttive. Consiste nel sottoporre un provino del materiale, opportunamente prelevato e preparato, ad un carico assiale che si prolunga fino alla rottura, imponendo una velocità di deformazione costante; come detto è un tipo di prova quasistatico, distruttiva e ci consente di determinare una serie di caratteristiche meccaniche molto importanti per il materiale che andremo ad analizzare.

Nello specifico viene utilizzato un provino solitamente di forma cilindrica, il quale viene bloccato da un'apposita macchina; tale macchinario quando viene messo in azione provoca un progressivo allungamento del provino fino a che esso raggiunge il suo punto di rottura.





Figura 3: esempi di macchine per la prova di trazione

La macchina di trazione è composta essenzialmente da:

1) un telaio chiuso costituito da una traversa fissa, da una mobile e da due montanti su cui si muove la traversa mobile; la traversa è azionata da un dispositivo idraulico (o elettromeccanico) ed è il movimento relativo tra le due traverse che permette di sollecitare il provino a trazione

2) due afferraggi, cioè delle morse idrauliche o meccaniche che consentono il corretto posizionamento e serraggio del provino in macchina (posizionati tra le due traverse)

3) traduttori i segnale, necessari per effettuare le misure utili per la prova, che misurano istante per istante:

- la forza applicata dal macchinario, tramite una cella di carico, messa in serie con il provino

- l'allungamento del provino, tramite un estensometro

4) da un sistema di acquisizione che permette di registrare le misure e di visualizzare l'andamento grafico della prova

1.4.1 Grafici tensione-deformazione

Il risultato della prova viene visualizzato mediante un grafico che mette in relazione la forza applicata e la variazione di lunghezza del provino. Tuttavia in questi termini i risultati sono influenzati dalla geometria del provino. Per svincolarsi da essa e determinare la resistenza effettiva del materiale in gioco, vengono introdotti due parametri fondamentali: Tensione nominale o ingegneristica:

$$s = \frac{F}{A_0} \left[\frac{N}{mm^2} = MPa \right]$$

Deformazione nominale o ingegneristica:

dove A_0 rappresenta l'area (sezione) iniziale del provino indeformato, F è la forza applicata, L_0 è la lunghezza del provino indeformato e $L_0 - L(\Delta L)$ è la differenza tra la lunghezza del tratto utile a fine prova e quella iniziale.

 $e = \frac{L-L_0}{L_0}$

Graficando queste due grandezze otteniamo il diagramma tensione deformazione nominale:



Figura 4: curva tensione-deformazione nominale (o ingegneristica)

Occorre tener conto che tale curva è influenzata da altri fattori come ad esempio: temperatura, velocità di deformazione, deformazione plastica precedente, trattamento termico preliminare e composizione chimica del materiale. Come si vede chiaramente dalla figura, possiamo distinguere delle zone di questa curva che presentano differenti comportamenti del materiale:

- *zona di deformazione elastica lineare*: il comportamento del materiale è elastico, cioè il materiale ritorna al suo stato originale (i legami non si rompono) e sussiste un legame proporzionale tra deformazioni e tensioni, noto come legge di Hooke s = Ee, dove E è il modulo di Young (o di elasticità) che corrisponde al coefficiente angolare della retta

- *zona di deformazione elastica non lineare*: è un breve tratto della curva in cui le deformazioni sul provino sono ancora elastiche e reversibili, ma viene a cadere il legame di linearità tra tensioni e deformazioni (cioè per cui non vale più la legge di Hooke)

- *snervamento*: rappresenta il limite tra la fase elastica e quella plastica; si raggiungono in campo elastico i valori massimi di tensione e deformazione. Oltre questo punto il materiale si deforma permanentemente; quando lo snervamento non si manifesta in maniera chiara si assume convenzionalmente che avviene in corrispondenza di una deformazione plastica pari allo 0.2%

- *zona di deformazione plastica*: ci sono qui in gioco due fenomeni contrastanti: l'incrudimento e la strizione. L'incrudimento causa un aumento delle tensioni all'aumentare della deformazione (aumento della resistenza meccanica); fin quando prevale questo fenomeno si vede nella curva (1°tratto) che la tensione aumenta con la deformazione.

Questo aumento si verifica fino ad un massimo nella curva, dove si ha il valore più alto di tensione; da qui in poi prevale l'effetto di diminuzione della sezione (necking) che sarà sempre più accentuata fino al verificarsi della rottura del provino.



Figura 5: confronto curva tensione-deformazione reale e ingegneristica

Oltre alle grandezze nominali o ingegneristiche, risulta importante definire anche le corrispondenti grandezze reali. La tensione reale a differenza di quella nominale si riferisce all'area istantanea del provino e non a quella iniziale; la deformazione reale è ottenuta integrando gli incrementi di deformazione, ognuno valutato sulla lunghezza istantanea:

Tensione reale: $\sigma = \frac{F}{A} \quad \left[\frac{N}{mm^2} = MPa\right]$ Deformazione reale: $\varepsilon = \int_{L_0}^{L} \frac{dl}{l} = ln \frac{L}{L_0}$

Possiamo fare delle considerazioni riguardo alle relazioni che esistono tra le grandezze reali e nominali (o ingegneristiche):

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad \text{quindi abbiamo} \quad \frac{L}{L_0} = 1 + e$$
$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + e)$$
$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F A_0}{A A_0} = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} = s \frac{A_0}{A}$$

Per quanto riguarda il campo elastico la tensione e deformazione nominale e reale si possono utilizzare indistintamente senza commettere grossi errori, cosa che vediamo chiaramente in figura 5, dove i due grafici coincidono e pertanto in entrambi i casi risulta valida la legge di Hooke. Le cose cambiano se ci troviamo nel tratto di curva di deformazione plastica; in campo plastico vale l'invarianza del volume che si scrive in termini matematici come:

$$A_0 L_0 = A L$$
 da cui $\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0}$

$$\sigma = s \frac{A_0}{A} = s \frac{L}{L_0} = s (1+e)$$

Dalle espressioni viste quindi deduciamo effettivamente che nel campo platico le due curve sono completamente differenti, in quanto $\varepsilon < e \circ \sigma > s$; in particolare per le tensioni la differenza risulterà apprezzabile solo per valori sufficientemente alti della deformazione. Quindi l'impiego delle tensioni reali al posto di quelle ingegneristiche permette di ottenere una curva sforzo-deformazione sempre crescente, che tiene conto esclusivamente del comportamento del materiale e in particolare del fenomeno dell'incrudimento.

1.4.2 Tensione e deformazione equivalente

Lo stato tensionale di un corpo tridimensionale è una grandezza tensoriale molto complessa da studiare (è una matrice 3x3 e 9 incognite); in questo senso la prova di trazione ci fornisce delle semplificazioni notevoli. Infatti essa è una prova di tipo monoassiale (il tutto si riduce ad una sola incognita) e ci fornisce direttamente i valori di tensione e deformazione equivalente:

- per le tensioni si ha $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ (stato monoassiale dove abbiamo considerato le tensioni tangenziali τ nulle dato che ci troviamo in un sistema di riferimento principale); applicando il criterio di Von Mises per il calcolo della tensione equivalente:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = \sigma_1$$

- per quanto riguarda le deformazioni, possiamo utilizzare l'equazione di continuità per le deformazioni principali: $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$. Dalla costanza del volume in campo plastico poi ricaviamo che $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$ e sostituita nella precedente alla fine otteniamo: $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3$. La deformazione equivalente si può calcolare con un'espressione simile a quella di Von Mises già utilizzata per le tensioni:

$$\varepsilon_e = \sqrt{\frac{2}{3}}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) = \varepsilon_1$$

Grazie a queste due formule fondamentali quindi possiamo ricondurre qualunque generico stato tensionale e deformativo triassiale a quello tipico della prova monoassiale. Questo è molto importante dato che possiamo comparare i valori equivalenti con diversi parametri (carico di snervamento, di rottura...) di materiali che già conosciamo, perché classificati con prove di trazione.

CAPITOLO 2: EFFETTO PORTEVIN LE CHATELIER

2.1 Introduzione

L'effetto di Portevin-Le Chatelier (PLC) è un fenomeno di instabilità che si verifica durante la deformazione plastica di un metallo o di una lega metallica, in particolare l'alluminio nel nostro caso. I fattori esterni che influiscono maggiormente sull'effetto PLC sono la deformazione ε , la velocità di deformazione ε e la temperatura *T* alle quali viene sottoposto il materiale durante la prova di trazione. L'effetto PLC è visibile solo in certi range di velocità di deformazione e temperatura, per questo motivo, variando questi due parametri, variano le tipologie di instabilità che si possono osservare. La stabilità della deformazione plastica dipende anche dalla rigidezza della macchina di prova che viene utilizzata e dalla rugosità superficiale dei campioni utilizzati. Altri fattori, che influenzano l'effetto Portevin-Le Chatelier, sono la composizione e la morfologia della microstruttura della lega, la densità delle dislocazioni e la dimensione dei grani.

La temperatura influisce sull'effetto PLC incrementando soprattutto la velocità e la capacità di diffusione degli atomi di soluto; questo perché la temperatura, quindi il calore, rappresenta una fonte di energia per il loro movimento nel materiale. Mentre, per quanto riguarda la velocità di deformazione, si ha che questa influisce sul tempo che le dislocazioni impiegano ad attraversare i precipitati e a disancorarsi dagli atomi di soluto. Anche la velocità di propagazione delle bande plastiche è legata alla temperatura. Solitamente a basse temperature, corrispondono basse velocità di propagazione; mentre ad alte temperature, corrispondono alte velocità di propagazione.

L'andamento del flusso della deformazione plastica è fortemente influenzato dalle dimensioni e dalla finitura superficiale del provino analizzato. Altri fattori che influenzano la deformazione plastica sono: la composizione della lega, la microstruttura, la densità delle dislocazioni e le dimensioni dei grani.

L'origine dell'effetto PLC può essere ricondotta al cosiddetto "*Dynamic strain aging*", un meccanismo microscopico che induce l'effetto PLC e che consiste in un'interazione dinamica tra le dislocazioni in movimento e gli atomi di soluto o i precipitati presenti nella lega, in questo modo il movimento delle dislocazioni viene ostacolato e si avrà un flusso di deformazione plastica instabile quando le dislocazioni si disancorano.

Se si prende un provino per una prova di trazione, lo si tratta superficialmente, levigandolo con una carta abrasiva molto fine per rimuovere le irregolarità superficiali e ottenere così una superficie il più regolare possibile e poi lo si sottopone ad una prova di trazione monoassiale, si potrà vedere che man mano che la deformazione plastica progredisce, quest'ultima tenderà a raggrupparsi sotto forma di bande che si muoveranno attraverso il provino in diversi modi, a seconda della tipologia e di come si sviluppa l'effetto PLC. Questo fenomeno sarà riconoscibile, sulla superficie del provino, quando si formeranno delle linee con un orientamento regolare. Si tratta di linee di scorrimento, ognuna delle quali sarà la traccia lasciata dalla fuoriuscita di una o più dislocazioni che si sono mosse su un certo piano di scorrimento. Quando queste linee di scorrimento si uniscono tra loro si ottiene una banda di scorrimento. Le bande di scorrimento più grandi possono anche essere visibili ad occhio nudo sulla superficie del provino.

L'effetto PLC quando si verifica, oltre a causare un decadimento delle proprietà strutturali del materiale, provoca anche un peggioramento della finitura e della rugosità superficiale del componente.



Figura 6: esempio di bande di scorrimento visibili sulla superficie di un provino in seguito a deformazione plastica

2.2 Jerky flow nel grafico tensione – deformazione

Se si traccia il grafico tensione – deformazione (σ - ε) di un provino soggetto ad una prova di trazione monoassiale in controllo di deformazione, dove la velocità di deformazione ε è mantenuta costante, si potrà osservare, nella curva nei tratti in deformazione plastica nei quali si manifesta l'effetto di Portevin-Le Chatelier, un andamento seghettato con frequenza e ampiezza caratteristiche. Questo comportamento è dovuto al fatto che la deformazione plastica, in questi punti, si propaga in maniera instabile e non omogenea. Infatti, quando il moto delle dislocazioni, durante la deformazione plastica, avviene senza particolari interruzioni, la curva nel grafico tensione - deformazione presenta un andamento continuo a tratti senza particolari discontinuità. Mentre quando il movimento delle dislocazioni viene ostacolato, ad esempio da atomi di soluto, precipitati o altre foreste di dislocazioni presenti all'interno della lega, la dislocazione si arresta temporaneamente sull'ostacolo e poi riprende il suo movimento. È proprio in questi punti che si ha la formazione delle bande plastiche, perché in questi punti le dislocazioni si accumulano e impilano le une sulle altre, in corrispondenza di un difetto o di un precipitato. Nel momento in cui queste si disancorano, dato che la deformazione è costante, si verifica una caduta istantanea del carico. Sul grafico tensione - deformazione, questo susseguirsi di ancoraggi e disancoraggi delle dislocazioni, appare come un andamento irregolare, discontinuo e seghettato, chiamato anche jerky flow.



Figura 7: curva tensione – deformazione che mostra l'andamento seghettato tipico dell'effetto PLC, in diverse leghe Al-Mg a temperatura ambiente

I tratti in cui la curva tensione – deformazione presenta un andamento seghettato, rappresentano le sezioni del provino in cui la deformazione plastica è più localizzata. Questo fa sì che al crescere della deformazione complessiva a cui sottoposto il componente, la deformazione plastica in queste zone crescerà a sua volta, fino a raggiungere dei livelli di deformazione localizzati molto più elevati rispetto alla deformazione complessiva. Sarà proprio in queste zone che si potrà raggiungere il collasso del provino.

2.3 Tipologie di bande plastiche di scorrimento

In molte leghe metalliche di tipo duttile (es. acciaio e alluminio) che vengono sottoposte a certi range di deformazione plastica e temperatura, dal loro grafico tensione- deformazione si può osservare un comportamento plastico instabile, l'effetto Portevin-Le Chatelier, che è caratterizzato da un andamento seghettato, il cui aspetto dipende dalla tipologia di bande plastiche che si manifestano. Esistono diverse tipologie di bande plastiche e comunemente vengono distinte in tre categorie: bande di tipo A, bande di tipo B e bande di tipo C. Esse si distinguono principalmente per l'ampiezza e la frequenza dell'oscillazione e per il diverso modo di propagazione. Inoltre, i diversi tipi di andamenti seghettati si sviluppano in diversi range di velocità di deformazione e di temperatura, per questo si può avere il passaggio da un tipo di banda all'altra a seconda del punto in cui ci troviamo del grafico tensione – deformazione.



Figura 8: tipologie di bande plastiche di scorrimento caratteristiche dell'effetto PLC nel grafico tensione – deformazione

Tipo A:

Le bande plastiche di tipo A solitamente si formano, quando il materiale è sottoposto ad alte velocità di deformazione e basse temperature. Tra tutte e tre le categorie di bande, queste sono quelle che presentano l'andamento seghettato più irregolare, con delle cadute di tensione piccole e localizzate lungo la curva tensione – deformazione. Attraverso degli studi condotti tramite l'analisi termografica, si è potuto vedere che, questa tipologia di bande tende a nucleare ad un estremo della lunghezza utile del provino, solitamente l'estremità fissa del provino, per poi propagare verso l'estremità mobile del provino, finché non si verifica la formazione di una banda stazionaria. Per questo motivo, il tipo A viene associato ad una propagazione continua e lineare della banda di deformazione plastica lungo la lunghezza del provino. Lungo il loro movimento di propagazione, le bande possono incontrare dei precipitati, che oppongono una certa resistenza alla propagazione, si traduce in piccolo salto di tensione seguito da una caduta di tensione, che genera così l'andamento seghettato tipico delle bande di tipo A. Con la propagazione delle bande di tipo A, la temperatura media della superficie del campione tende ad aumentare con la deformazione.

Tipo B:

Le bande plastiche di tipo B solitamente si formano dopo che si sono sviluppate le oscillazioni del tipo A, oppure quando il materiale è sottoposto a valori intermedi di velocità di deformazione e temperatura. In alcuni casi, negli stadi iniziale dell'effetto PLC è possibile osservare delle multibande, aggregati di due o più bande, che nucleano simultaneamente o durante la propagazione di un'altra banda. Rispetto al tipo A, l'andamento seghettato è più regolare, le cadute di tensione sono maggiori e presentano una frequenza e un'ampiezza di oscillazione più regolare rispetto alle bande di tipo A. Le bande di tipo B hanno una nucleazione casuale lungo la lunghezza utile del provino e la loro propagazione è discontinua e saltellante lungo la direzione di applicazione del carico al provino e continua attraverso il provino finché la deformazione continua in questa banda stazionaria. Successivamente la deformazione continua in questa banda stazionaria di taglio che porta ad una diminuzione della sezione del provino e infine al collasso. Attraverso degli studi condotti tramite l'analisi termografica, si è potuto constatare che, questa tipologia di bande tende a nucleare in un tempo molto breve e, successivamente, propaga lungo lo spessore del provino ad una velocità di

3600 mm/s. In questo caso il cambiamento nell'inclinazione della banda, nel grafico tensione – deformazione, produce un grosso calo della sollecitazione seguito successivamente da una risalita, dovuto all'andamento saltellante lungo il campione, che genera così l'andamento seghettato tipico delle bande di tipo B.

Tipo C:

Le bande plastiche di tipo C solitamente si formano quando il materiale è sottoposto a bassi valori di velocità di deformazione e alte temperature. Rispetto ai tipi A e B, è molto facile osservare delle multibande. L'andamento seghettato di questa tipologia di bande presenta dei valori, di frequenza e ampiezza di oscillazione, elevati e approssimativamente costanti; per questi motivi è molto regolare e presenta dei salti regolari di tensione, che possono essere associati al fatto che bande plastiche nucleano in maniera casuale lungo il provino senza mostrare alcun tipo di propagazione e che producono delle deformazioni plastiche localizzate accompagnate da consistenti cadute di carico. Questo significa che, per questa tipologia di bande, a ciascuna caduta di tensione visibile nella curva tensione – deformazione, corrisponde la formazione di una banda.

2.4 Dynamic Strain Aging (DSA)

Prima di iniziare a descrivere questo fenomeno, bisogna introdurre alcune importanti proprietà dell'alluminio riguardanti la sua struttura atomica e cristallina; esse saranno il nostro punto di partenza e ci permetteranno di comprendere fino in fondo questo fenomeno.

2.4.1 Alluminio elemento chimico

Innanzitutto sappiamo che l'alluminio (Al) è un metallo appartenente al terzo gruppo della tavola periodica e da essa vediamo le sue caratteristiche principali:

- numero atomico = 13

- peso atomico = 26,98 (unità di massa atomica)
- valenza = 3 (cioè 3 elettroni di legame)



Figura 9: atomo di alluminio

Chimicamente, proprio in virtù di appartenere al terzo gruppo presenta delle sue specifiche proprietà già introdotte nel capitolo iniziale (affini a tutti gli altri elementi del medesimo gruppo): lucentezza, buona conducibilità termica ed elettrica, leggerezza, alta densità rispetto ai materiali non metallici, duttilità, malleabilità e si trova allo stato solido a temperatura ambiente.

Essendo l'alluminio un metallo, il legame dei suoi atomi è di tipo metallico; gli elettroni esterni sono debolmente legati al nucleo in quanto schermati da quelli che appartengono agli orbitali interni. Tale tipo di legame si forma quando ogni atomo metallico fornisce i suoi elettroni di valenza per dare origine ad una nuvola di elettroni (teoria della "nube elettronica") che circonda uno scheletro di ioni carichi

positivamente; in tal modo gli elettroni non appartengono più ai singoli atomi, ma sono condivisi da tutti (elettroni delocalizzati). Questo spiega il perché del fatto che l'alluminio possiede un'elevata conducibilità elettrica e termica.

2.4.2 Reticolo cristallino

Una sostanza solida si può presentare in due forme strutturali differenti in base al tipo di solidificazione che è avvenuta: struttura cristallina o amorfa. Tralasciando quella amorfa tipica di vetri e silicati, ci concentreremo su quella cristallina che caratterizza metalli e ceramici.

Una struttura cristallina è caratterizzata da un ordine a lungo raggio. Il concetto fondamentale è che gli atomi tendono a legarsi tra loro in modo tale da minimizzare l'energia di legame; per questo la solidificazione in strutture ordinate consente di ottenere strutture caratterizzate da distanze interatomiche minori e con un legame più stabile. I solidi metallici sono i più semplici poiché formati da atomi di un solo tipo senza legami direzionali e per questo la loro organizzazione dipende quasi esclusivamente da regole geometriche.

Se consideriamo gli atomi come punti (assumiamo valido un modello a sfere rigide), essi costituiscono un reticolo cristallino se si ripetono in modo regolare nelle tre dimensioni. Gli atomi occupano i punti di intersezione che costituiscono il reticolo, cioè i nodi. L'unità ripetitiva che forma il cristallo prende il nome di cella elementare; i parametri della cella, identificabili con lunghezze ed angoli, sono unici per ogni sostanza cristallina. Esistono in natura 14 tipi di celle elementari, note come reticoli di Bravais; tuttavia in ambito ingegneristico trovano interesse solo 3 di esse, dato che la stragrande maggioranza dei metalli (intorno al 90%) le possiede: cubica a corpo centrato (CCC), cubica a facce centrate (CFC) ed esagonale compatta (EC).

In particolare l'alluminio presenta una cella cubica a facce centrate (CFC); questo tipo di cella presenta un atomo per ciascun vertice del cubo e uno al centro di ogni faccia. Tramite la rappresentazione a sfere rigide vediamo come gli atomi si toccano lungo le diagonali di ciascuna faccia.



Figura 10: cella cubica a facce centrate (CFC)

Per ogni tipo di cella possiamo definire dei parametri che la identificano e la caratterizzano:

- numero di atomi per cella: in una struttura CFC gli atomi sui vertici sono condivisi da altre 8 celle elementari, mentre gli atomi al centro delle facce appartengono a due celle n°atomi per cella (CFC) = 8*(1/8) + 6*(1/2) = 4 atomi

- numero di coordinazione: rappresenta il numero di atomi più vicino a ciascun atomo (in contatto con quell'atomo). Per una cella CFC il numero di coordinazione è 12, prendendo come riferimento l'atomo al centro di una faccia.

- dimensione del lato della cella (a): tramite semplici relazioni trigonometriche si può trovare un'espressione che collega tale dimensione con il raggio atomico (in questo caso per l'alluminio si ha R = 143 pm = 0,143 nm). Come illustrato nella figura 9d, sfruttando il fatto che gli atomi si toccano lungo la diagonale della faccia del cubo, si arriva alla seguente relazione:

$$\sqrt{2} a = 4R \quad \rightarrow \quad a = \frac{4R}{\sqrt{2}} = \frac{4 * 0.143}{\sqrt{2}} = 0.404 \ nm$$

2.4.3 Difetti del reticolo: dislocazioni

I reticoli cristallini di cui abbiamo parlato finora sono stati considerati perfetti; invece nella realtà bisognerà tenere conto che non tutti gli atomi si trovino nelle loro precise posizioni e dato il loro elevatissimo numero in un grano cristallino sicuramente, a livello statistico, sarà presente un'imperfezione.

Proprio la presenza di questi difetti è correlata intrinsecamente alle proprietà di un determinato materiale. Normalmente i difetti vengono classificati in base alla zona del reticolo che interessano; i più comuni sono: difetti di punto (riguardano 1-2 posizioni atomiche), difetti di linea (monodimensionali), difetti di superficie (bidimensionali) e difetti di volume (tridimensionali).

Nella nostra trattazione, che ha la finalità di spiegare il fenomeno del DSA, i difetti che tratteremo sono quelli di linea, i quali prendono il nome di dislocazioni. Esistono 2 tipologie di dislocazioni:

- *dislocazioni a spigolo*: si ha un semi piano atomico in più nel reticolo cristallino ed impedisce a tutti gli atomi di essere legati tra loro

- *dislocazioni a vite*: si possono immaginare come atomi disposti lungo una scala a chiocciola, come se la parte superiore del cristallo scivolasse di una distanza interatomica rispetto alla parte inferiore



Figura 11: dislocazioni a spigolo e a vite

Le dislocazioni possono spostarsi all'interno di un reticolo se sottoposte a sforzi. Tale movimento avviene su un piano, detto di scorrimento del cristallo, che rappresenta il piano di massima compattazione. Ogni struttura ha un piano di scorrimento specifico; in particolare il cubico facce centrate ha come piano di scorrimento e quindi come piano di massima compattazione quello della diagonale del cubo. Le dislocazioni non possono terminare in mezzo al cristallo, ma solo sulla superficie o su altre dislocazioni. Esistono diversi tipi di movimenti:

1. *Glide* (dislocazioni a spigolo e vite) = scorrimento delle dislocazioni che provoca una deformazione plastica del materiale. Lo scorrimento avviene sui piani di massima compattazione.

2. *Climb* (dislocazioni a spigolo) = se la dislocazione non si trova sul piano di massima compattazione queste possono saltare di piano grazie alla sollecitazione termica o alla presenza reticolare di difetti di

punto. L'interazione tra difetti di punto e dislocazione è quindi importante perché permette di aumentare la mobilità delle dislocazioni.

3. Cross slip (dislocazioni a vite) = cioè cambiamento di piano di scorrimento.

Le dislocazioni sono di fondamentale importanza in quanto giocano un ruolo centrale nella deformabilità dei metalli; il movimento di esse è il meccanismo microscopico responsabile della deformazione plastica.

Se confrontiamo la forza necessaria alla deformazione plastica calcolata teoricamente con quella misurata sperimentalmente si può osservare che i due valori non coincidono. Infatti i dati rilevati dagli esperimenti e prove di laboratorio dimostrano che la forza necessaria è fino a quattro ordini di grandezza inferiori a quelle calcolabili dalle formule. Proprio la presenza delle dislocazioni è responsabile di questa discrepanza di risultati.

Se in campo elastico si produce una distorsione dei legami atomici, ma non si arriva ad una loro rottura, in una deformazione plastica invece la sollecitazione distorce i legami fino a rottura; il meccanismo di deformazione è semplificabile ipotizzando un movimento rigido di una parte del reticolo sull'altra, secondo dei piani e direzioni ben precise, che vengono chiamati rispettivamente piani di scorrimento cristallino e direzioni di scorrimento. In base alla teoria di Frank-Read con la deformazione plastica aumentano le dislocazioni (aumento della loro densità); in questo modo si verificano delle interazioni tra le varie dislocazioni che portano ad ostacolare il flusso plastico del materiale (fungono proprio da ostacolo al moto delle dislocazioni stesse). Il risultato di tutto ciò è il fenomeno dell'incrudimento: all'aumentare della deformazione, aumenta progressivamente anche la forza necessaria alla deformazione.

2.4.4 Dynamic Strain Aging

Una delle teorie più valide per spigare l'effetto Portevin-Le Chatelier è appunto quella del DSA. Il moto delle dislocazioni non è un processo continuo, dato che esso si blocca quando una dislocazione interagisce con un'altra per effetto di forze che si instaurano tra esse. Proprio nel momento in cui si ha questo blocco di dislocazioni, se nel reticolo vi sono intrappolate delle particelle interstiziali di soluto (cosa molto comune nelle leghe), tali particelle, diffondendosi, vanno a circondare le dislocazioni e quindi non fanno altro che rafforzarle e bloccarle ulteriormente.

Quando la deformazione raggiunge un livello tale da far sbloccare le dislocazioni, esse riprendono il loro moto fino a quando non incontrano un nuovo ostacolo, che andrà così a bloccarle di nuovo. Perciò il flusso plastico sarà inevitabilmente discontinuo.



Figura 12: spiegazione grafica del fenomeno DSA

Questa teoria trova conferma dato che tale effetto si manifesta solo su leghe di alluminio ed acciaio, le quali contengono una notevole presenza di particelle interstiziali di soluto, imprescindibili affinché si manifesti il DSA. Oltre a questo il fenomeno risulta sempre maggiore, tanto quanto l'alligazione è accentuata, oltre ad essere strettamente connesso ai trattamenti termici subiti in precedenza dalla lega.

2.5 Strain Rate Sensivity (SRS)

Un altro importante parametro di riferimento per spiegare il fenomeno PLC è lo Strain Rate Sensibility (SRS), cioè la sensibilità della tensione alla velocità di deformazione. Normalmente se osserviamo due curve sforzo – deformazione caratterizzate da due diversi valori di velocità di deformazione, con ad esempio $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, si nota chiaramente che aumentando ε si ha un conseguente aumento di tensione (in figura le curve tendono a picchi di tensione più alti).



Figura 13: curve tensione-deformazione al variare della velocità di deformazione È

Questo comportamento non si verifica per materiali che presentano l'effetto PLC; su questi in particolare vediamo dal grafico $(\dot{\varepsilon}, \sigma)$ un andamento differente della tensione in base alla velocità di deformazione. In assenza del PLC tale curva sarebbe crescente dal momento che la tensione non può mai diminuire con l'aumento di velocità di deformazione; invece guardando il grafico sottostante (è un profilo ad "N") si possono riconoscere delle zone caratteristiche:

- per $\dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}_1$: la deformazione rimane su bassi valori e quindi in questo tratto non abbiamo l'effetto PLC e la tensione aumenta con $\dot{\varepsilon}$, comportando un fattore SRS positivo

- per $\varepsilon_1 < \dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon_2}$: qui la situazione cambia completamente; per velocità di deformazione intermedie le dislocazioni vengono bloccate e come risultato di ciò si nota un drastico abbassamento della tensione, quindi con un fattore SRS negativo

- per $\dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}_2$: con velocità di deformazione elevate gli atomi di soluto non hanno il tempo di diffondersi intorno alle dislocazioni che quindi non vengono più bloccate; di conseguenza l'effetto PLC in questa fase scompare e la tensione torna ad aumentare, con l'SRS sempre positivo.



Figura 14: andamento teorico della tensione al variare della velocità di deformazione in un materiale con effetto PLC

CAPITOLO 3: ANALISI SPERIMENTALE DELL'EFFETTO PLC

3.1 Digital Image Correlation (DIC)

La correlazione d'immagini digitali (DIC) è un potente e innovativo strumento che per misurare spostamenti e deformazioni, si basa su una tecnica di misura ottica senza stabilire un contatto con il provino sul quale si vogliono fare le rilevazioni. Per questo può essere utilizzato per acquisire e registrare delle immagini e tracciare su di esse gli spostamenti di determinati punti di riferimento. In molti casi le immagini utilizzate vengono ottenute tramite sensori fotografici.

La Digital Image Correlation si pone l'obiettivo di misurare la deformazione a tutto campo sul campione analizzato, è un metodo non intrusivo, perché non influisce sul campione o sul suo comportamento; può essere applicata per misurare la deformazione solo su provini con superfici piane. Può essere 2D quando si utilizza un solo obiettivo, oppure 3D quando si utilizzano due obiettivi.

Tale tecnica basa il proprio funzionamento sul confronto di fotografie digitali, di un provino o di un componente sul quale si stanno facendo dei determinati esperimenti, scattate a diversi istanti di tempo. Successivamente il software del modello DIC (nel nostro caso utilizziamo il software MatchID), tracciando un blocco di pixels, è in grado di misurare gli spostamenti sulla superficie del provino e costruire così un campo 2D o 3D (a seconda che si usino una o due videocamere nel sistema DIC) di vettori relativi all'andamento delle deformazioni che si verificano nel provino analizzato. Affinché il sistema DIC possa lavorare come si deve è necessario che la distribuzione dei blocchi di pixels sia di tipo casuale e che presentino dei range di contrasto e di intensità unici tra loro. Questo è fondamentale affinché non ci siano blocchi di pixels simili tra loro, altrimenti il sistema potrebbe andare in confusione e commettere degli errori nelle misurazioni.

Con questa tecnica ogni cambiamento nella struttura del componente può essere facilmente confrontato con le immagini catturate inizialmente che vengono utilizzate come riferimento. In questo modo risulta più semplice riconoscere le anomalie che potrebbero causare un comportamento inaspettato del campione. Viene utilizzato per fare misure sia in campo di spostamento sia in campo di deformazione. Prima di realizzare una misurazione DIC bisogna definire e settare tutta una serie di parametri tra cui la densità di correlazione dei puntini che definiscono il pattern, l'algoritmo di correlazione, le dimensioni dei subset, la spaziatura della griglia tra i subset e il grado di grigio del pattern sulla superficie del provino.

L'idea di funzionamento su cui si basa questo metodo è quella di trovare il campo di spostamenti di determinati punti sulla superficie del campione analizzato e tracciare e analizzare la deformazione di un pattern puntinato che era stato preventivamente realizzato sulla superficie del campione. Si calcolano gli spostamenti e il campo di deformazione relativi ad una o più immagini deformate (che prendono il nome di immagini correnti) e li si confrontano con una specifica immagine presa come riferimento ad inizio prova.

In questo modo si ottengono delle vere e proprie mappe di deformazione dell'intera superficie del campione che sono individuabili visivamente attraverso una scala cromatica in relazione alla diversa entità della deformazione lungo il provino.

3.2 Configurazione e setup del sistema

Prima di effettuare le prove di acquisizione della correlazione d'immagini digitali, bisogna configurare un sistema DIC come segue. La superficie dell'oggetto sulla quale si scatteranno le fotografie deve essere illuminata uniformemente in modo da ottenere un buon contrasto nell'immagine. L'immagine non deve essere né troppo chiara, né troppo scura; l'importante è ottenere un'illuminazione sufficiente e uniforme a garantire un buon contrasto. Il provino deve essere posizionato in modo tale da avere la superficie d'interesse, sulla quale bisogna fare le acquisizioni, perpendicolare al sensore fotografico.



Figura 15: setup del sistema utilizzato per studiare le prove di trazione con la correlazione d'immagini digitali (DIC)

La macchina di trazione, utilizzata per eseguire tutte le prove di trazione, è controllata da un computer. I provini vengono montati e afferrati dalle teste di afferraggio e disposti in maniera tale da avere la superficie ricoperta dal pattern verso il sensore fotografico. La testa di afferraggio superiore del provino è vincolata alla cella di carico fissa della macchina e rimane ferma, mentre la testa inferiore del provino è vincolata al pistone mobile della macchina, che si muoverà unicamente verso il basso, dato che deve effettuare delle prove di trazione monoassiale. Il sensore fotografico è di tipo CCD (Charge Couple Device) e viene utilizzato di questo tipo, perché in questo modo si riesce ad attenuare il rumore di fondo nelle immagini acquisite. Il sensore è attaccato alla scheda di acquisizione, e il tutto viene posizionato su un supporto treppiede davanti al provino ad una distanza di circa 30 cm. La scheda di acquisizione viene collegata poi al Timing Hub e al computer DIC. Il Timing Hub è un dispositivo che funge da interfaccia tra il computer che controlla la macchina e il computer DIC; il suo compito è quello di sincronizzare i dati e inviarli al computer DIC. Per misurare la deformazione lungo l'asse longitudinale alla direzione di applicazione del carico, lungo il tratto utile del provino, è stato usato un estensimetro, che viene attaccato sulla parte posteriore del provino, in modo da non interferire con l'acquisizione delle immagini. I valori di deformazione misurati dall'estensimetro vengono poi inviati al computer che controlla la macchina, il quale invia al Timing Hub, i valori di carico applicati durante la prova di trazione dalla macchina e i valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Infine, il Timing Hub è collegato al computer DIC, il quale riceverà sia i valori di carico e deformazione, sia le immagini inviate dalla scheda di acquisizione del sensore fotografico.

Una volta collegata tutta l'attrezzatura e dopo aver ricoperto la superficie del campione col pattern stocastico e aver effettuato le operazioni di setup e calibrazione, è possibile effettuare la prova di trazione e fare la correlazione d'immagini digitali. Prima di iniziare la prova, è possibile modificare la regione d'interesse (ROI) sul computer del DIC, in modo da riprendere solamente la zona della superficie del provino interessata. In questo modo diminuendo l'area d'interesse è possibile aumentare la frequenza di acquisizione delle immagini. Un fatto importante che è bene tenere a mente è che il software DIC non fa molta distinzione tra un provino piccolo che viene ripreso da vicino e un provino più grande che viene ripreso da più lontano, perché per il programma per la superficie che viene acquisita, sotto forma di fotogrammi, durante il processo di acquisizione delle immagini, contano solo i pixel che vengono ripresi e che costituiscono le immagini. Il software, che si trova sul computer DIC, si occupa di gestire le operazioni di setup, calibrazione, calcolo e analisi, fornendo alla fine della correlazione i risultati delle immagini finali. Alla fine della prova di trazione, dalle acquisizioni DIC verranno poi calcolati i valori di spostamenti e deformazioni che verranno poi confrontati con i valori deformazione misurati dall'estensimetro, in modo tale da stabilire il grado di accuratezza nel calcolo delle deformazioni da parte della correlazione d'immagini digitali, calcolandone l'errore di misurazione e tracciando dei grafici qualitativi che ne mostrino l'andamento, usando come riferimento i valori di deformazione misurati dall'estensimetro. Invece, i grafici di tensione – deformazione verranno realizzati utilizzando i valori di deformazione misurati dall'estensimetro e i valori di carico salvati dalla macchina; dopo aver appurato il grado di precisione della correlazione d'immagini digitali sarà possibile utilizzare i valori di deformazione calcolate tramite DIC.

3.3 Principio di funzionamento

Quando su conduce un'analisi DIC è necessario mantenere il sensore fotografico, tramite il quale si fanno le acquisizioni di fotogrammi, perfettamente perpendicolare alla superficie del campione che si vuole analizzare e inoltre la distanza focale tra la superficie che verrà ripresa e il sensore fotografico deve rimanere costante. In questo modo viene assicurata la complanarità tra il campo di spostamenti e, di conseguenza di deformazioni, la superficie del provino di riferimento. Al fine di ottenere un'elevata accuratezza dei risultati è necessario che queste condizioni rimangano inalterate e costanti durante lo svolgimento della prova e delle acquisizioni. Se così non fosse, verrebbero generate delle deformazioni apparenti che andrebbero a sommarsi alle deformazioni realmente calcolate, generando così degli errori, non identificabili ed eliminabili, nel calcolo delle deformazioni.

Prima di partire con le acquisizioni, la superficie in oggetto deve essere ricoperta con un pattern stocastico, ovvero costituito da puntini di vernice bianca e nera in maniera casuale. Durante le acquisizioni, il sensore fotografico acquisisce fotogrammi ad una certa frequenza preimpostata ed insieme ad essi, attraverso la scheda di acquisizione, anche i valori delle grandezze provenienti dal computer della macchina di trazione, valori di carico o deformazione a seconda della prova che si conduce e del segnale in output dal pc. Il primo fotogramma acquisito fa sempre riferimento alla condizione iniziale del campione, ovvero la configurazione indeformata e viene poi diviso come una scacchiera in quadrati più o meno grandi che prendono il nome di facets o subset. L'analisi di calcolo DIC, che viene poi condotta al termine della prova di trazione, effettua un confronto tra il fotogramma iniziale di riferimento e quelli acquisiti successivamente, in modo da calcolare il campo di spostamenti e di conseguenza le deformazioni.



Figura 16: tracking del subset intorno al marker di riferimento partendo dall'istante iniziale di riferimento t e in due istanti di tempo successivi t' e t"

I livelli di grigio presenti tra i pixels di un'immagine digitale dopo deformazione vengono interpolati per ottenere gli spostamenti con una risoluzione dell'ordine dei sub-pixels. Gli spostamenti vengono poi determinati risolvendo delle equazioni non lineari, considerando la deformazione di un subset e non del singolo pixel. Dopo di che le deformazioni vengono ottenute partendo dagli spostamenti e risolvendo delle equazioni differenziali. Siccome a ciascun pixel corrisponde un certo livello di grigio, non viene ricercata la corrispondenza tra i singoli pixels, perché ci potrebbero essere dei pixels con valori di grigio uguali nelle immagini deformate; per questo motivo la ricerca viene fatta sulle regioni quadrate comprendenti più pixels, i subsets. In questo modo, si va alla ricerca di un subset nell'immagine deformata che presenti la stessa distribuzione di livelli di grigio dello stesso subset nell'immagine precedente alla deformazione.

3.4 Parametri fondamentali dell'analisi DIC

Ora vediamo un po'più nel dettaglio i singoli parametri che andremo a variare nella nostra analisi DIC, che varieranno conseguentemente le mappe di deformazione del provino.

Come già detto in precedenza il procedimento di image matching è in grado di restituire il campo di spostamenti della superficie analizzata con accuratezza sub-pixel. Nella pratica ingegneristica spesso più che degli spostamenti è richiesta la conoscenza delle deformazioni e per questo appare di estrema utilità anche la stima di queste ultime. Facendo una stima quindi risulta evidente quindi che variando determinati parametri le deformazioni cambieranno valore (infatti potremo trovare valori totalmente differenti ad esempio variando la dimensione del subset); questo è dato dal fatto che nell'analisi DIC quello che abitualmente si fa è un operazione di "smoothing" (lisciamento), che consiste nell'applicazione di una funzione di filtro il cui scopo è evidenziare i pattern significativi, attenuando il rumore generato da artefatti ambientali, elettrici, elettronici, informatici oppure altri fenomeni di disturbo legati a fattori di scala molto piccoli.

Elenchiamo ora le principali grandezze da tenere in considerazione nell'analisi, la maggior parte delle quali varieremo nelle diverse analisi.

3.4.1 Pattern

Dato che il calcolo degli spostamenti si traduce nella ricerca della corrispondenza dei subset all'interno delle immagini acquisite, risulta evidente l'importanza rivestita dall'impiego di un pattern (schema o modello) adeguato con il quale marcare la superficie oggetto della misurazione. Lo speciale pattern utilizzato per analisi DIC prende il nome di "speckle pattern", traducibile letteralmente come pattern a macchioline o a puntini, per via del suo caratteristico aspetto. Questo si presenta tipicamente composto da macchioline scure di grandezza uniforme disposte su sfondo bianco per massimizzare il contrasto.



Figura 17: esempi di speckle pattern utilizzato nell'analisi DIC

I parametri importanti per la costruzione di un buon pattern influenzano direttamente la grandezza ottimale del subset da scegliersi per l'analisi DIC. Uno dei primi parametri da considerare è indubbiamente la grandezza media dei puntini scuri che formano il pattern, intesa come diametro medio degli stessi in pixel sulle immagini acquisite dalla fotocamera. Sono consigliati valori che vanno da un massimo ottimale di 5 pixel ad un minimo di 3 pixel. È da considerarsi un secondo parametro importante per il pattern il "factor coverage" (fattore di riempimento) cioè la percentuale dei pixel scuri rispetto alla totalità dei punti acquisiti, e che assicura misure ottimali se compreso fra il 40% e il 70%.

3.4.2 Region of interest (ROI)

Dopo aver definito il pattern, prima di iniziare con la vera e propria analisi, in realtà quello che si fa è di definire una regione dove poi verrà svolta l'analisi dal software. Tale regione prende il nome di "region of interest" ed è definita da un certo numero di pixel del pattern. Nel nostro caso, per una prova di trazione, prenderemo come regione di riferimento tutta quella parte di provino racchiusa dagli afferraggi della macchina di trazione (entro la sezione utile del provino stesso), dato che quello che ci interessa osservare è la formazione delle bande di deformazione e il loro scorrimento sul provino. Appare chiaro dunque che più la parte di provino scelta sarà maggiore e avremo un punto di vista migliore per cercare e identificare le bande di scorrimento che si formano durante la deformazione.



Figura 18: scelta della "region of interest" in un provino sottoposto a trazione

3.4.3 Subset size

Un primo importante parametro della vera e propria DIC è la subset size (dimensione del sottoinsieme). Infatti per condurre l'analisi la prima cosa da fare è dividere la nostra regione di interesse dell'immagine iniziale non deformata (già selezionata in precedenza) in degli ulteriori sottoinsiemi detti "subset", i quali non sono altro che delle porzioni quadrate della ROI. La dimensione di questi quadrati, cioè il loro lato, è la subset size; essa è misurata in pixel, che sono l'unità fondamentale dell'immagine digitale, ed è un importante parametro che ci permette di identificare l'errore che andremo a commettere nella nostra analisi.

Nella figura sottostante vediamo come varia l'errore di misura (espresso dalla deviazione standard) con la subset size. Nel primo caso prendiamo un subset da 27x27 pixel e nel secondo uno da 51x51; dalle curve è chiaramente visibile come all'aumentare della subset size diminuisca l'errore commesso, e di conseguenza la misurazione avrà una qualità migliore.



Figura 19: variazione dell'errore di misura nell'analisi DIC al variare della subset size

3.4.4 Step size

Come secondo parametro importante della nostra analisi, definiamo la step size, che è correlato molto da vicino alla subset size. Infatti è definita come la distanza tra i centri dei subset e anch'essa viene data in pixel; chiaramente dalla sua definizione deve possedere un valore necessariamente più piccolo rispetto alla subset size. Questo fatto si riconosce immediatamente quando andiamo a lavorare sul software, dato che ci viene direttamente fornita una finestra di valori ammissibili per la step size, in base al valore di subset size precedentemente scelto.

Anche questo parametro può influire sull'errore di misurazione (anche se in termine di peso influisce di più la subset size) se vengono scelti dei determinati valori. Facciamo meglio chiarezza: se prendiamo valori di step size più vicini alla subset size scelta, è evidente che i punti di riferimento per la misura sono minori (richiede una minore complessità a livello di calcolo), ma l'errore stesso sarà maggiore e in tal caso l'operazione di smoothing sarà eccessiva e condizionerà il risultato. Al contrario più aumentiamo il valore, più aumenterà la risoluzione spaziale (si avranno molti più subset nella ROI, con un aumento di punti disponibili per effettuare la misurazione) e di conseguenza l'errore sulla misura sarà di gran lunga ridotto.

La figura sotto riportata dà in tal senso una rappresentazione visiva al tutto; le regioni delimitate dai punti rossi rappresentano i subset, che sono in numero tanto maggiore, quanto più piccolo è il valore dello step size.



Figura 20: esempio di alcuni possibili valori di step size ammissibili

3.4.5 Strain window

Con i primi due parametri introdotti siamo in grado tramite il software DIC di calcolare gli spostamenti; dagli spostamenti tuttavia occorre passare al calcolo delle deformazioni, che sono quelle che a noi interessano. La prima cosa che facciamo dopo aver calcolato gli spostamenti, al fine di aumentare l'accuratezza sulle deformazioni, è un'operazione di smoothing preliminare sugli spostamenti stessi seguita infine dalla differenziazione (in quanto la deformazione lungo una determinata direzione per definizione è uguale alla derivata parziale dello spostamento nella stessa direzione).

Il suo funzionamento prevede l'impiego di una finestra di calcolo (strain window) attorno ai punti in cui calcolare le deformazioni sufficientemente piccola da poter considerare gli spostamenti come lineari nel piano. Una volta noti differenziando è possibile trovare i valori di deformazione del punto centrale della finestra. È evidente che le dimensioni della finestra influenzano significativamente i risultati: una finestra piccola non è efficace nell'abbattimento del rumore degli spostamenti, mentre una finestra grande porta ad un'erronea approssimazione lineare delle deformazioni calcolate.

3.5 Analisi della deformazione al variare dei parametri DIC

Ora che abbiamo introdotto tutti i parametri di cui abbiamo bisogno, possiamo effettuare l'analisi sperimentale. Per studiare sperimentalmente l'effetto Portevin Le Chatelier, sono state effettuate delle prove di trazione su provini di alluminio AA5754, quindi della serie 5xxx, una tra le più utilizzate soprattutto per processi produttivi di deformazione plastica. La macchina utilizzata per effettuare le prove di trazione è una Zwick-Roell Z050, che permette di calcolare i dati dalla traversa con una frequenza di campionamento 50Hz, fornendo i valori di tensione e deformazione ingegneristica.

In particolare il nostro interesse sarà focalizzato solamente su una prova, che facciamo adottando una velocità di deformazione pari a 3 mm/s. Dopo aver allestito il tutto, sia per la prova di trazione che per l'attrezzatura DIC (posizionamento delle fotocamere, preparazione dei pattern da applicare sui provini), lasciamo andare la prova fino a quando il provino arriva a rottura.

Nel corso della prova vengono, come precedentemente già spiegato, scattate molte fotografie ravvicinate che ci fanno vedere come si sta andando progressivamente la deformazione del provino, che nell'analisi DIC si vede con la deformazione del pattern. Una volta terminata la prova avremo dunque vari frame (fotogrammi), in base alla quantità di fotografie scattate.

In particolare, nel nostro caso, tra l'inizio della prova e la frattura del provino abbiamo acquisito 4000 frame. Con tutti questi frame vediamo come evolve la deformazione nel corso dell'intera prova;

tuttavia un numero così grande di acquisizioni costituisce per noi un problema principalmente per due ragioni. In primis il software DIC impiegherebbe molto più tempo per l'analisi, ma la motivazione maggiore è data al fatto che siamo interessati ad osservare le bande di deformazione, tipiche dell'effetto Portevin Le Chatelier, che si trovano in una determinata nella regione di deformazione plastica della curva tensione-deformazione. Perciò per questi motivi ciò che si fa di solito è limitare i frame del nostro studio: dei 4000 frame totali quindi ne prendiamo uno ogni dieci, in modo tale da condurre la nostra analisi non più sulla totalità dei frame, ma su un numero minore (pari a 4010/10 = 401).

Prima	colonna	$a = n^{\circ} f h$	rame	Seconda	colonna	a = tempo	o trasco	orso da in	izio pr	ova (s)	
0.000	0.000										
10.000	0.930	140.000	13.211	270.000	25.492	400.000	37.772	530.000	50.053	660.000	62.333
20.000	1.875	150.000	14.156	280.000	26.437	410.000	38.717	540.000	50.998	670.000	63.278
30.000	2.820	160.000	15.101	290.000	27.381	420.000	39.661	550.000	51.941	680.000	64.223
40.000	3.765	170.000	16.046	300.000	28.326	430.000	40.606	560.000	52.888	690.000	65.168
50.000	4.709	180.000	16.990	310.000	29.271	440.000	41.551	570.000	53.841	700.000	66.112
60.000	5.653	190.000	17.935	320.000	30.215	450.000	42.496	580.000	54.776	710.000	67.058
70.000	6.599	200.000	18.879	330.000	31.160	460.000	43.440	590.000	55.721	720.000	68.002
80.000	7.543	210.000	19.824	340.000	32.105	470.000	44.385	600.000	56.666	730.000	68.946
90.000	8.488	220.000	20.769	350.000	33.050	480.000	45.330	610.000	57.610	740.000	69.891
100.000	9.433	230.000	21.713	360.000	33.994	490.000	46.274	620.000	58.556	750.000	70.844
110.000	10.378	240.000	22.657	370.000	34.938	500.000	47.219	630.000	59.500	760.000	71.781
120.000	11.322	250.000	23.604	380.000	35.883	510.000	48.164	640.000	60.444	770.000	72.726
130.000	12.267	260.000	24.547	390.000	36.828	520.000	49.108	650.000	61.390	780.000	73.670

Figura 21: frame iniziali utilizzati nella nostra analisi DIC. Nella figura ci siamo limitati a prendere tutti i frame fino al 780, intervallati uno ogni 10; i frame continuano fino al frame 4010 con un tempo trascorso dall'inizio della prova di 379,076 secondi, dato che la frattura del provino si verifica precisamente al frame 4018.

Quindi inseriamo nel software MatchID l'immagine di riferimento e i 400 frame, che corrispondono alle immagini deformate del provino. A questo punto il software, dopo aver inserito i valori di subset e step size, fa la correlazione tra l'immagine di riferimento e quelle deformate, dando come risultato la mappa degli spostamenti dei punti del provino.

A noi tuttavia interessano le deformazioni, che si calcoliamo dopo il processo di correlazione (in una sezione "post processing" - "strain"), tramite degli algoritmi complessi. I parametri che ci vengono richiesti per il calcolo delle deformazioni sono: la strain window e l'algoritmo di correlazione. Se per la strain window cambieremo il valore in base alla prova, per l'algoritmo ne assumeremo uno standard per tutte le prove che faremo, quello "logaritmico di Euler-Almansi", di cui non entriamo nel dettaglio. Fissati questi due parametri quello che il software ci dà come risultato finale sono delle mappe di deformazione, che ci fanno vedere il valore e la distribuzione della deformazione nei vari punti del provino durante tutta la durata della prova.

Finora dunque abbiamo inserito i dati nel software, che ci ha fornito i risultati che volevamo. Poiché il nostro scopo è quello di visualizzare le bande tipiche dell'effetto Portevin Le Chatelier, tra tutte le immagini forniteci dal software, per esporre i risultati della nostra analisi, selezioniamo quelle in cui vediamo tali bande di scorrimento in modo più nitido (ci limiteremo a mostrare 6 immagini per ciascuna prova che andremo a fare). Oltre a visualizzare visivamente le bande, un altro aspetto cruciale da analizzare è come variano tali bande cambiando i parametri DIC definiti in precedenza.

Per questo ciò che andremo a fare sono diverse analisi, variando di volta in volta i parametri tipici dell'analisi DIC (subset size, step size e strain window). Come valori di riferimento per la subset size ne scegliamo tre indicativi (31,15,7), che rappresentano 3 casi nettamente differenti, in quanto si passa da un valore alto 31, ad un valore intermedio 15 ed infine ad uno molto piccolo come 3.

Riguardo i valori della step size, come abbiamo già detto, essi dipenderanno dai valori scelti come subset size (infatti nel software saremo costretti ad assumere solo determinati valori). Prenderemo quindi tre valori che appartengono alla nostra finestra (in particolare 15,7,3) con i quali cercheremo di coprire tutti i casi possibili da analizzare.

L'altro parametro importante che assumeremo durante la deformazione e che caratterizzerà i nostri risultati in maniera significativa è la strain window. Per essa, così come fatto con gli altri parametri, prenderemo due valori (15,3), uno piccolo e uno elevato, per vedere il loro effetto sulla deformazione. Nella tabella sottostante è presentato un riassunto schematico delle varie analisi che abbiamo fatto (sono 10) con i relativi parametri DIC utilizzati.

	Subset size	Step size	Strain window
Caso 1	31	15	15
Caso 2	31	15	3
Caso 3	31	3	15
Caso 4	31	3	3
Caso 5	15	7	15
Caso 6	15	7	3
Caso 7	7	3	15
Caso 8	7	3	3
Caso 9	3	3	15
Caso 10	3	3	3

Figura 22: tabella riassuntiva con i parametri scelti nelle analisi fatte

Per ogni analisi fatta dunque prenderemo le 6 immagini dove si vedono in maniera più netta le bande di scorrimento, caratteristica fondamentale dell'effetto Portevin Le Chatelier. Le pagine seguenti quindi riportano tutti i risultati ottenuti per ciascuna prova effettuata, seguendo l'ordine già esposto nella tabella sopra.



Figura 23: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 31, step size = 15 e strain window = 15)



Figura 24: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size =31, step size =15 e strain window =3)



Figura 25: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 31, step size = 3 e strain window = 15)



Figura 26: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 31, step size = 3 e strain window = 3)



Figura 27: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 15, step size = 7 e strain window = 15)



Figura 28: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 15, step size = 7 e strain window = 3)



Figura 29: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 7, step size = 3 e strain window = 15)



Figura 30: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 7, step size = 3 e strain window = 3)



Figura 31: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 3, step size = 3 e strain window = 15)



Figura 32: mappe di deformazione lungo il provino calcolate con analisi DIC (subset size = 3, step size = 3 e strain window = 15)











15,7,15 (caso 5)















Figura 33: confronto della deformazione nei vari casi per uno stesso frame (time 125)

Dalle immagini appena ottenute in relazione ai diversi parametri scelti possiamo trarre alcuni importanti risultati, i quali ci dicono se la scelta di tali parametri è risultata opportuna oppure no (elencheremo i risultati facendo riferimento alla tabella già vista, non ripetendo di volta in volta il valore dei parametri):

- caso 1: si nota la chiara presenza di bande di deformazione, che risultano abbastanza ampie e meno fitte rispetto alle immagini successive

- casi 2,3,5: le immagini della deformazione in queste 3 diverse analisi rispecchiano nel miglior modo come avviene realmente la deformazione. Le bande sono molto ravvicinate e inclinate a 45 gradi (si vedono chiaramente delle multibande). Perciò, come già detto, con una bassa velocità di deformazione, sappiamo che si formano delle bande di tipo C, caratterizzate da valori di frequenza e ampiezza di oscillazione elevati e approssimativamente costanti. In conclusione in questi casi si nota una coincidenza tra i risultati dell'analisi DIC e quello che realmente si verifica; questo significa i parametri scelti (subset e step size, strain window) sono buoni

- casi 4,6,7: continuiamo a vedere le bande di deformazione, tuttavia esse non sono più nitide e chiaramente visibili come lo erano prima. Ciò significa che ci stiamo allontanando dai parametri ideali e stiamo entrando in una fase dove iniziano a vedersi i primi errori di misura, localizzati solamente in alcuni punti del provino

- casi 8,9,10: a differenza di tutti i casi precedenti qui non si vedono più bande e la deformazione è uniforme nel provino ad eccezione di alcune zone. Esse rappresentano un chiaro errore di misura, dovuto all'errato smoothing; tali parametri (bassi subset e step size) non filtrano correttamente il rumore di misura dovuto ad artefatti o altri tipi di disturbi indesiderati. Il risultato finale sarà alterato e dunque i parametri scelti non rispecchiano il comportamento reale

Nell'ultima figura, a conclusione della nostra analisi sperimentale, abbiamo riportato un confronto delle varie mappe di deformazione ottenute nei diversi casi per uno stesso frame, nel nostro caso corrispondente a time = 125. Facciamo ciò per avere un confronto puntuale di come variano l'entità della deformazione e l'ampiezza delle bande al variare dei parametri scelti. Facciamo così come nel caso precedente una analisi di ciascuno dei vari casi:

- caso 1: si nota un'ampiezza delle bande chiaramente maggiore e una deformazione che varia come valori tra 0,058 e 0,064

- casi 2,3,4,5,6,7: le bande nei seguenti casi sono simili in termine di ampiezza; sono meno ampie rispetto al caso 1 però sono nettamente più visibili dalla mappa. Come valori massimi e minimi per la deformazione oscilliamo tra 0,085 (caso 7) e 0,066 (caso 5) per quanto riguarda i valori massimi; per quelli minimi invece il range è compreso tra 0,038 (caso 7) e 0,055 (caso 5). Rispetto dunque al primo caso visto si ha un incremento per quanto riguarda i valori massimi e una diminuzione dei valori minimi della deformazione

- caso 8: le bande in questo caso spariscono e la deformazione è praticamente uniforme con valori all'incirca di 0,059. Il fatto che non si vedano più le bande stesse è un segnale che ci fa capire come ci stiamo allontanando dai parametri ideali da scegliere

- casi 9,10: qui l'errore commesso è talmente alto che non si riesce, con la correlazione d'immagine, ad arrivare al frame con time 125 (si arriva al massimo al time 83). Ciò è un chiaro segno che siamo in una zona di errore che falsa il risultato

CONCLUSIONI

Nell'elaborato viene valutato l'effetto Portevin Le Chatelier su provini di alluminio tramite elaborazione di immagini digitali (DIC). Tale metodo ci ha permesso di ottenere delle immagini, che forniscono una rappresentazione visiva della deformazione nel provino durante la prova.

Grazie ad esse siamo in grado di valutare che l'effetto PLC si manifesta attraverso delle bande di deformazione (o di scorrimento) nel campo plastico del materiale. Ciò è dato dal fatto che le dislocazioni, fattore determinante per questo tipo di effetto, vengono bloccate per mutua interazione tra esse e quindi il flusso plastico del materiale risulta discontinuo.

In particolare nel nostro caso ci siamo concentrati ad analizzare una prova di trazione di un provino di alluminio, eseguita ad una velocità di deformazione di 3 mm/s. Già da una prima analisi della curva tensione-deformazione emerge come per basse velocità di prova, nello specifico 3mm/s, la dentellatura della curva tensione deformazione è molto accentuata, il che fa ipotizzare la presenza di bande di tipo C; ciò poi trova riscontro in modo chiaro nelle mappe di deformazione, dove si vedono in maniera evidente le bande. Tali bande però sono visibili in modo così nitido solamente per determinati parametri DIC scelti.

Si è visto che per valori elevati di subset size (indipendentemente da step size e strain window) le bande sono visibili in modo netto; invece man mano che ci avviciniamo a bassi valori di subset size (e di conseguenza bassa step size), come ad esempio 7, le bande iniziano a scomparire. Le mappe di deformazione diventano uniformi e si vedono chiaramente degli errori, che provano il fatto che lo smoothing non è stato svolto in modo corretto; infatti sono stati scelti dei parametri che non riescono ad annullare il rumore generato da artefatti o da altri tipi di disturbi. Ciò ovviamente causa un errore di misura che indica l'erronea selezione dei parametri scelti.

In conclusione quello che abbiamo capito sull'analisi DIC è che si tratta di un processo che richiede molta attenzione sulla scelta dei parametri significativi: ci sono dei parametri ottimali, con i quali si vede come effettivamente si deforma il provino, e altri che costituiscono un errore e che pertanto falseranno i risultati dell'analisi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Silvia Barella, Andrea Grattadauria, *Metallurgia e materiali non metallici*, Società editrice Esculapio
- [2] University of South Carolina, *Digital Image Correlation: overview of principles and software,* Correlated Solutions Inc.
- [3] Filippo Gabrielli, Rosolino Ippolito, Fabrizio Micari, *Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche*, McGraw-Hill
- [4] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, Shingley, *Progetto e Costruzione di macchine*, McGraw-Hill Education
- [5] Tero Makinen, *Portevin- Le Chatelier effect in an aluminium alloy*, Aalto University School of Science Degree Programme in Engineering Physics and Mathematics (2016)
- [6] C. Watrisse, A. Chrysochoos, J. M. Muracciole, M. Nemoz-Gaillard, Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation, Experimental Mechanics, vol. 41 (2001)
- [7] Dr. Nick McCormick, Dr. Jerry Lord National Physical Laboratory, *Digital Image Correlation*, Materialstoday vol. 13, number 12 (2010)