

Analisi metallurgica di due spade rinascimentali

Original

Analisi metallurgica di due spade rinascimentali / Matteis, P.; Scavino, G.. - In: LA METALLURGIA ITALIANA. - ISSN 0026-0843. - STAMPA. - 113:7/8(2021), pp. 52-62.

Availability:

This version is available at: 11583/2948486 since: 2022-01-14T15:58:34Z

Publisher:

Associazione Italiana di Metallurgia

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Analisi metallurgica di due spade rinascimentali

a cura di: P. Matteis, G. Scavino

Dopo una breve introduzione delle tecniche di produzione dell'acciaio e di forgiatura delle spade, impiegate nell'Italia settentrionale tra il XV ed il XVI secolo, sono qui esaminate due spade fabbricate in questo contesto storico e geografico e conservate presso il Museo delle Armi L. Marzoli di Brescia. Numerosi campioni in sezione sono stati ricavati dal pomo, dalla guardia, dal codolo e dalla lama di ciascuna spada e sono stati caratterizzati mediante metallografia ottica e misure di microdurezza. I risultati sperimentali sono riportati in dettaglio e le possibili vie di produzione dei manufatti esaminati sono ipotizzate e discusse sulla base dei medesimi risultati e delle tecniche storiche.

PAROLE CHIAVE: METALLURGIA STORICA, SPADE, XV SECOLO, METALLOGRAFIA, FORGIATURA, TRATTAMENTO TERMICO

INTRODUZIONE

Tra il XV ed il XVI secolo, nell'Italia settentrionale, la produzione di armi e di armature era un'attività consolidata, caratterizzata da ampi distretti industriali che comprendevano tutte le fasi produttive, inclusi la fabbricazione dell'acciaio, la forgiatura, l'assemblaggio e la lucidatura [1-4].

In questo periodo, la produzione di acciaio a medio o alto tenore di carbonio era generalmente molto più difficile della produzione di ferro battuto a basso tenore di carbonio; l'acciaio era quindi considerato di valore molto più alto del ferro battuto, ed era impiegato solo per utensili e armi [5-7].

Il termine "acciaio" è qui usato nella sua accezione storica nel periodo in esame, cioè per indicare una lega ferrosa che poteva essere sia forgiata a caldo che indurita mediante tempra; questa lega normalmente conteneva tra lo 0,4 e l'1,5% in peso di carbonio, ma sia l'importanza del carbonio che il suo tenore nell'acciaio erano all'epoca sconosciuti [5,8]; similmente, il termine "ferro battuto" è qui usato per indicare una lega ferrosa storica, a basso tenore di carbonio, che poteva essere facilmente forgiata a caldo, ma non temprata.

Un possibile metodo per la produzione dell'acciaio in questo periodo era la cementazione, in cui piccoli pezzi di ferro battuto erano riscaldati in ambiente carburante; i pezzi di acciaio così ottenuti potevano poi essere saldati per forgiatura per fabbricare prodotti più grandi [5,7]. Questo metodo era utilizzato nell'Italia settentrionale fin dall'alto medioevo [9].

P. Matteis, G. Scavino

Politecnico di Torino – DISAT

In alternativa, era possibile produrre un acciaio ipereutet-toidico mediante carburazione e fusione di piccoli pezzi di ferro battuto sigillati all'interno di un crogiolo insieme a carbonella di legna (o altre fonti di carbonio). Nel periodo qui esaminato quest'ultimo procedimento non era noto in Europa, ma veniva utilizzato in India, ed il suo prodotto, chiamato (in diversi periodi e contesti) acciaio al crogiolo, acciaio Wootz o acciaio di Damasco, veniva importato in Europa in piccole quantità [1,5,10].

Il ferro battuto utilizzato come materia prima per i processi sopra menzionati era a sua volta fabbricato o per riduzione diretta del minerale in un bassoforno, oppure per affinamento della ghisa in un altoforno [1,5], ed era un materiale con tenore di carbonio basso o bassissimo, generalmente con una microstruttura ferritico-perlitica disomogenea, con ampie variazioni locali del contenuto di carbonio e con abbondanti inclusioni di scoria allungate nella direzione di forgiatura [11].

L'acciaio poteva anche essere fabbricato direttamente dal minerale di ferro utilizzando una variante del suddetto processo di riduzione diretta. Il primo passo del processo di riduzione diretta era eseguito in un piccolo forno discontinuo caricato con minerale e carbonella di legna. La combustione della carbonella realizzava un ambiente riducente ed il minerale di ferro era ridotto a ferro metallico allo stato solido, producendo una spugna di ferro solida, detta blumo, e una scoria liquida; una parte della scoria era trattenuta nelle porosità del blumo stesso. Nella seconda fase, il blumo era forgiato ad alta temperatura, in modo da espellere la maggior parte della scoria e da chiudere la maggior parte dei pori. Il risultato di questo processo era normalmente il ferro battuto. Tuttavia, se si aumentava la temperatura del forno di riduzione (aumentando la portata d'aria, il rapporto tra carbone e minerale o la dimensione del forno), o si aumentava la durata del processo, o entrambe le cose, il metallo non era solo ridotto, ma anche carburato allo stato solido, ed era quindi possibile ottenere l'acciaio direttamente dal minerale [1,5-7]. Questo risultato era favorito da un'opportuna scelta del minerale di ferro [6,7,12], ma l'effettiva quantità di carbonio nell'acciaio dipendeva in gran parte dall'abilità ed esperienza del fabbro [12]. Nel periodo qui esaminato, questo metodo era utilizzato soprattutto in Stiria per la produzione di acciaio di alta qualità destinato ad armi ed armature [1,13].

Infine, l'acciaio poteva essere fabbricato mediante la decarburazione parziale della ghisa. Questo metodo era simile al processo indiretto, sopra menzionato, che era usato nello stesso periodo per la produzione del ferro battuto. La prima

fase del processo indiretto era svolta in un altoforno alimentato a carbonella di legna, dove il minerale era ridotto ed il metallo era completamente fuso e legato con carbonio. Il metallo liquido, o ghisa, era poi separato dalla scoria liquida, raffreddato e solidificato. Successivamente, in un forno di affinazione, anch'esso alimentato a carbonella di legna, la ghisa veniva rifiusa ed ossidata con un flusso d'aria ed a contatto con scorie ossidanti: silicio, manganese, carbonio ed altri elementi erano gradualmente eliminati per ossidazione ed infine la ghisa era convertita in ferro a basso tenore di carbonio. La temperatura dei forni di affinamento non era però abbastanza alta da mantenere il ferro allo stato liquido dopo la rimozione del carbonio; pertanto si otteneva ferro allo stato semisolido (con impurità), con residui di scoria al suo interno. Il ferro era poi forgiato ed una parte della scoria era rimossa, come nel processo diretto. Anche in questo caso il risultato finale era ordinariamente ferro battuto. Se, però, il processo di affinamento era condotto in modo tale da ottenere una decarburazione più lenta e in ultima analisi parziale, era possibile ottenere acciai a medio o alto tenore di carbonio [1,5,12]. Ciò poteva essere ottenuto con una azione appropriata del fabbro (per esempio, rimescolando più o meno vigorosamente, il fabbro potrebbe accelerare o rallentare la reazione tra il metallo e la scoria ossidante) e con una opportuna scelta del minerale e della scoria (per esempio, la scoria è meno reattiva se contiene maggior quantità di ossido di manganese, proveniente dalla ghisa stessa ed in ultima analisi da un minerale ricco di manganese) [12]. Questo era probabilmente il metodo principale utilizzato nell'Italia settentrionale nel periodo qui esaminato [1,2], ed era ancora usato occasionalmente in quest'area nel XIX secolo [12].

Le lame delle spade erano poi prodotte utilizzando acciaio e/o ferro battuto derivanti dalle suddette lavorazioni, mediante forgiatura a caldo, trattamento termico ed infine molatura e lucidatura.

La forgiatura prolungata della lama, spesso con passi ripetuti di piegatura e saldatura (sempre mediante forgiatura), contribuiva a ridurre la quantità di scorie e la porosità ed a migliorare l'omogeneità chimica, portando alla comune osservazione che le lame di spada, se confrontate con altri manufatti ferrosi dello stesso periodo, mostrano generalmente meno pori e inclusioni di scoria e una distribuzione del carbonio più omogenea [1,5].

Inoltre, la saldatura per forgiatura di più strati di acciaio e di ferro battuto era comunemente impiegata per produrre lame composite, o per utilizzare la minor quantità possibile

di acciaio (a causa del suo maggior costo), o per ottenere un gradiente di proprietà meccaniche (un tagliente ad alto tenore di carbonio ed un cuore a basso tenore di carbonio), o per entrambe queste ragioni insieme [1,5].

La maggior parte (ma non tutte) le lame erano poi sottoposte a trattamento termico. Nel Medioevo, il trattamento termico era comunemente o una tempra incompleta, che conduceva a microstrutture miste, o una tempra interrotta, cioè una tempra parziale seguita da autorinvenimento, ottenuta estraendo la lama dal mezzo di tempra mentre il cuore era ancora caldo, mentre la bonifica completa divenne comune solo dal XV secolo in poi [13], probabilmente a causa dei risultati variabili derivanti dalla variabilità del contenuto di carbonio e delle temperature di processo.

Uno studio riguardante oltre 50 lame europee fabbricate tra l'XI ed il XVII secolo ha dimostrato che, nel periodo

qui considerato, cioè tra il XV ed il XVI secolo, la maggior parte delle spade o erano costituite interamente da acciaio ipoeutetoidico temprato, o presentavano un cuore a basso tenore di carbonio e bordi (taglienti) temprati ad alto tenore di carbonio [13].

REPERTI E METODI DI ESAME

Due spade, attinenti al contesto geografico e storico sopra descritto, sono qui esaminate mediante metallografia ottica e prove di microdurezza, al fine di studiarne la microstruttura e il processo produttivo. Le due spade esaminate (figura 1) appartengono al Museo delle Armi L. Marzoli di Brescia, e si ritiene che entrambe siano state fabbricate nel Nord Italia alla fine del XV secolo.

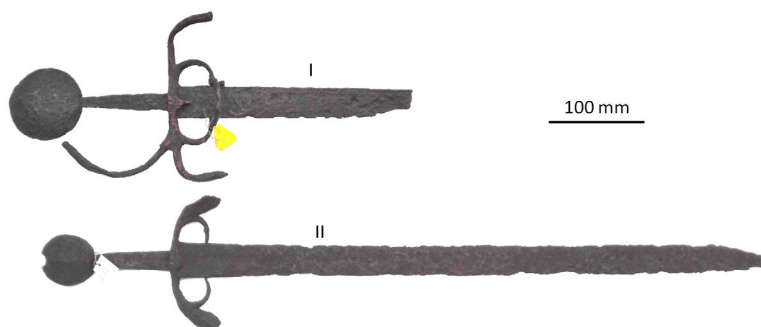


Fig.1 - Spade I e II esaminate. - *Examined swords I and II.*

La spada I è classificata nell'inventario del museo con il numero G6 ed è costituita da una lama ad un solo tagliente, spezzata, larga circa 37 mm, fornita di un pomolo lenticolare, avente un diametro di 80 mm, e di una guardia ricurva larga circa 187 mm. La lunghezza totale conservata della spada è di 430 mm. In base alla scheda museale ed alle caratteristiche stilistiche e morfologiche, si ritiene che la spada I fu probabilmente realizzata a Belluno intorno all'anno 1485; essa è stata inclusa in cataloghi precedenti della collezione Marzoli [14] e delle armi italiane [15].

La spada II è classificata nell'inventario del museo con il numero G8 ed è costituita da una lama a due taglienti, anch'essa spezzata, con sguscio, fornita di pomolo lenticolare, con diametro di 55 mm, e di una guardia a bracci piatti larga circa 133 mm. La lunghezza totale conservata è di 780 mm. Secondo la scheda museale e concordemente con il suo stile e la sua forma, questa spada fu probabilmente realizzata nel nord Italia intorno all'anno 1480.

Nel medesimo museo sono conservate numerose spade simili, fabbricate nello stesso periodo e regione, ed in ottimo stato di conservazione, mentre entrambe le spade in esame

sono rotte ed hanno subito una estesa corrosione; perciò è stato autorizzato un esame parzialmente distruttivo.

I campioni esaminati sono stati prelevati dalle due spade nel laboratorio del Museo delle Armi L. Marzoli, utilizzando una troncatrice portatile con mola abrasiva; durante questa operazione, la temperatura del manufatto è stata monitorata con una termocoppia e la procedura è stata interrotta quando necessario per evitare ogni alterazione dovuta all'eccessivo riscaldamento.

Complessivamente, sono stati ricavati in questo modo 4 campioni dalla spada I e 6 campioni dalla spada II. In particolare il campione I-G è stato ricavato dalla guardia, il campione I-C dal codolo ed i campioni I-L1 ed I-L2 dalla lama della spada I (figura 2); inoltre il campione II-P è stato ricavato dal pomolo, il campione II-G dalla guardia, il campione II-C dal codolo ed i campioni II-L1, II-L2 e II-L3 dalla lama della spada II (figura 3). In un secondo tempo è stato ricavato un ulteriore campione dal pomolo della spada I, che non è qui commentato. Dopo questi prelievi, le parti rimanenti delle due spade sono state lasciate presso il medesimo museo, dove sono tuttora conservate.

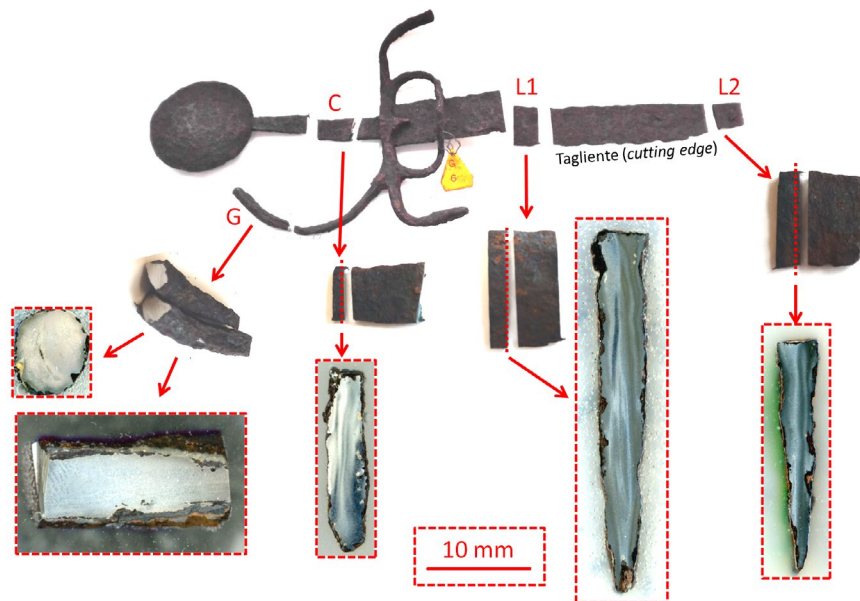


Fig.2 - Campioni G, C, L1 ed L2 tagliati dalla spada I e loro sezioni metallografiche attaccate. La barra di scala si riferisce alle sezioni metallografiche. - *Specimens G, C, L1 and L2 cut from sword I and ensuing etched metallographic cross-sections. The scale bar refers to the cross sections.*

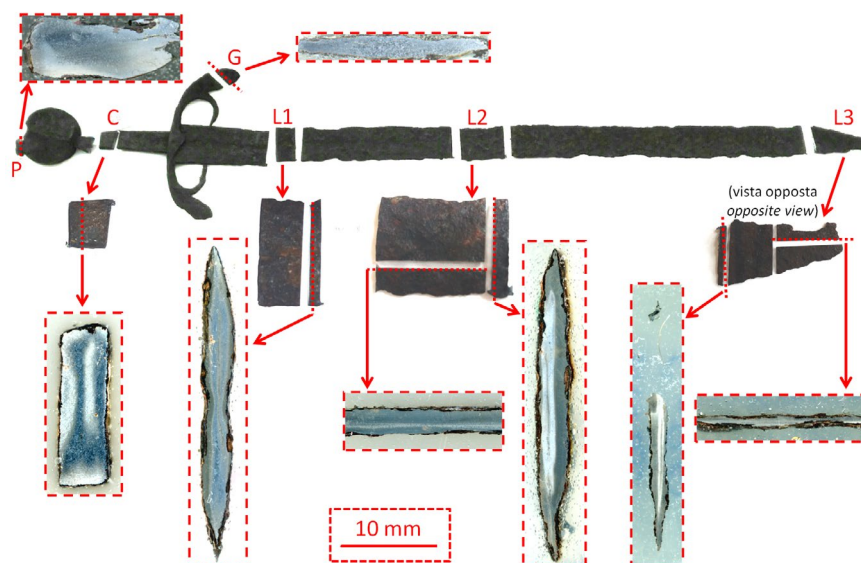


Fig.3 - Campioni P, G, C, L1, L2 ed L3 tagliati dalla spada II e loro sezioni metallografiche attaccate. La barra di scala si riferisce alle sezioni metallografiche. - *Specimens P, G, C, L1, L2 and L3 cut from sword II and ensuing etched metallographic cross-sections. The scale bar refers to the cross sections.*

I campioni sono stati poi ulteriormente tagliati utilizzando una troncattrice da laboratorio con mola abrasiva, allo scopo di ricavare dei provini metallografici; durante questa operazione i provini sono stati mantenuti a temperatura ambiente dal fluido da taglio. Infine i provini sono stati montati, molati e lucidati secondo la consueta pratica metallografica. Le sezioni metallografiche esaminate corrispondono tutte a tagli

eseguiti con la troncattrice da laboratorio.

Dopo un esame preliminare allo stato lucidato, le sezioni metallografiche sono state attaccate con Nital (acido nitrico 3%, etanolo 97 %). I provini metallografici sono stati infine esaminati al microscopio ottico e sottoposti a prove di microdurezza, normalmente con un carico di 0,3 kg (in alcuni casi, sotto specificati, è stato usato un carico minore). La

sequenza di campionamento complessiva e le sezioni metallografiche qui esaminate sono mostrate nelle figure 2 e 3, rispettivamente, per le due spade.

RISULTATI

Spada I

La spada I è formata da tre parti metalliche fabbricate separatamente e poi montate: il pomolo (che non è stato esaminato), la guardia e la lama; quest'ultima è forgiata in un solo pezzo, includente il codolo ed il tagliente.

Il campione I-G corrispondente all'estremità di un braccio della guardia (figura 2). Dall'esame di questo campione si è potuto concludere che la guardia è stata fabbricata con una vergella a medio tenore di carbonio, mediante la saldatura alla forgia di almeno due parti, con una giunzione longitudinale incompleta. La microstruttura è costituita da perlite fine e ferrite e la durezza è compresa tra 160 e 295 HV_{0,1}. Probabilmente, dopo la forgiatura a caldo, la guardia fu raffreddata in aria, producendo, a causa della piccola sezione trasversale, la microstruttura suddetta.

La lama della medesima spada I è stata studiata in dettaglio, mediante l'esame dei tre campioni I-C, I-L1 ed I-L2 (figura 2). I tre campioni I-C, I-L1 ed I-L2 sono tutti sezioni trasversali

complete ed il campione I-L2 corrisponde all'estremità residua della lama spezzata. Scelto come riferimento il margine posteriore (cioè più prossimo al pomolo) della guardia, la sezione metallografica esaminata nel campione I-C, ricavato dal codolo, è circa 4 cm dietro alla guardia, mentre le sezioni esaminate nei campioni I-L1 ed I-L2, ricavati dal tagliente, si trovano circa 11 e 25 cm davanti alla guardia, rispettivamente.

La sezione trasversale del codolo, dopo l'attacco metallografico (figura 2, campione I-C) presenta una evidente disomogeneità, determinata dalla variabilità del tenore di carbonio; non si osservano però linee di giunzione riconducibili a saldature; dunque si ritiene che la disomogeneità del tenore di carbonio derivi direttamente dal processo produttivo dell'acciaio, sopra descritto, e che l'orientamento delle bande a diverso tenore di carbonio sia quello determinato dalle successive deformazioni plastiche. L'esame microscopico ottico (figura 4) mostra che la microstruttura del codolo è costituita in grande prevalenza da ferrite e perlite, con tracce di bainite e inclusioni di scoria. La durezza è compresa tra 95 e 215 HV. Sia la microstruttura, sia la microdurezza, sono perciò compatibili con un raffreddamento relativamente lento dopo la forgiatura in campo austenitico.

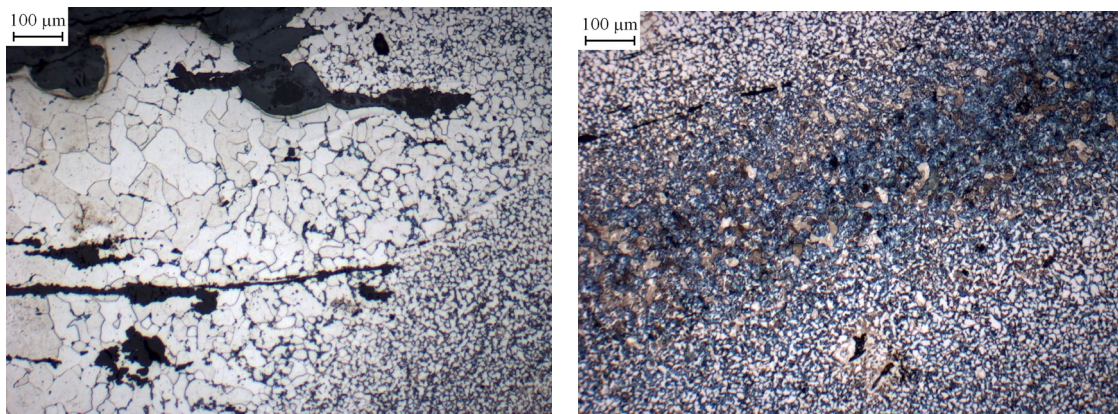


Fig.4 - Microstruttura del codolo della spada I (campione I-C, sezione trasversale, microscopia ottica): zona a basso (a) ed alto (b) tenore di carbonio. - *Microstructure of the tang of sword I (specimen I-C, cross section, optical microscopy): low carbon (a) and high carbon (b) zones.*

Anche le due sezioni trasversali della lama presentano, come la sezione del codolo, una evidente disomogeneità del tenore di carbonio; anche in questo caso, l'assenza di linee di saldatura porta a concludere che la disomogeneità derivi dal processo produttivo dell'acciaio e sia conforme alle deformazioni plastiche successive; questa conclusione è inoltre qui rafforzata dal fatto che la disposizione delle regioni ad

alto e basso tenore di carbonio non appare razionale o comunque utile per le prestazioni meccaniche del manufatto (figura 2, campioni I-L1 ed I-L2).

Le microstrutture osservate, nelle medesime sezioni della lama, sono però nettamente diverse da quelle osservate nel codolo; in entrambi i casi, infatti, si osservano microstrutture miste riconducibili ad una tempra incompleta. In partico-

latare, nella sezione trasversale della lama, a circa 11 cm dalla guardia, in prossimità del bordo tagliente, la microstruttura è costituita da martensite oppure martensite e ferrite (figura 5a); mentre nella regione centrale della sezione ed in pros-

simità del bordo opposto (non tagliente) la microstruttura è di tipo misto, con regioni a basso carbonio a prevalenza di ferrite e perlite e regioni ad alto carbonio con microstrutture prevalentemente bainitiche (figura 5b).

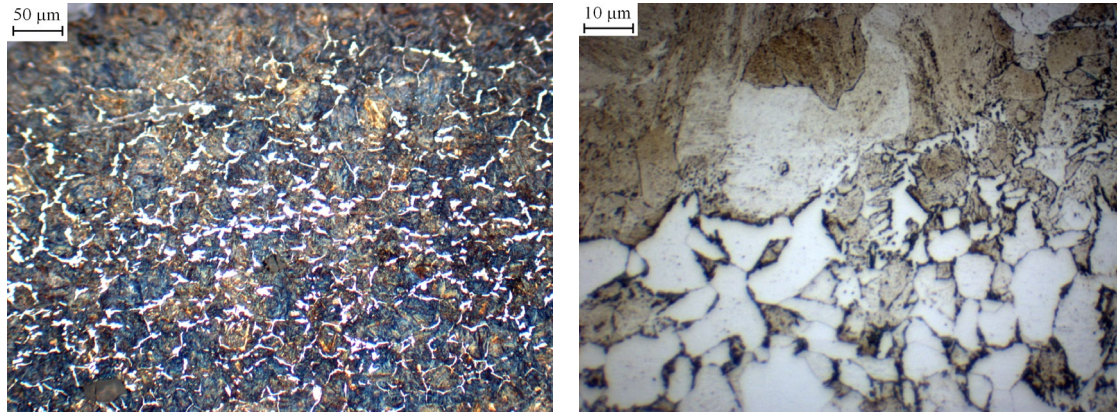


Fig.5 - Microstruttura della lama della spada I, a circa 11 cm dalla guardia (campione I-L1, sezione trasversale, microscopia ottica): martensite e ferrite in prossimità del bordo tagliente (a); microstrutture miste nella regione centrale della sezione (b). - *Microstructure of the blade of sword I, about 11 cm from the guard (specimen I-L1, cross section, optical microscopy): martensite and ferrite near the cutting edge (a); mixed microstructures in the central region (b).*

La microdurezza è compresa tra 580 e 650 HV nella regione superficiale e prossima al tagliente, ed è compresa tra 250 e 650 HV nell'intera sezione esaminata. La prevalenza di martensite nella regione del bordo tagliente può essere stata determinata dal minor spessore locale, che consente una tempra più veloce (rispetto al bordo opposto); mentre la presenza di ferrite nella medesima regione si può ricondurre ad una temperatura di austenitizzazione insufficiente

rispetto al tenore di carbonio locale, oppure ad un parziale raffreddamento in aria prima della tempra vera e propria, che fu eseguita probabilmente in acqua.

Anche la seconda sezione esaminata della lama, a distanza di 25 cm dalla guardia, presenta microstrutture miste (figura 6); la microdurezza è in questo caso compresa tra 500 e 645 HV in prossimità della superficie e tra 195 e 645 HV nell'intera sezione.

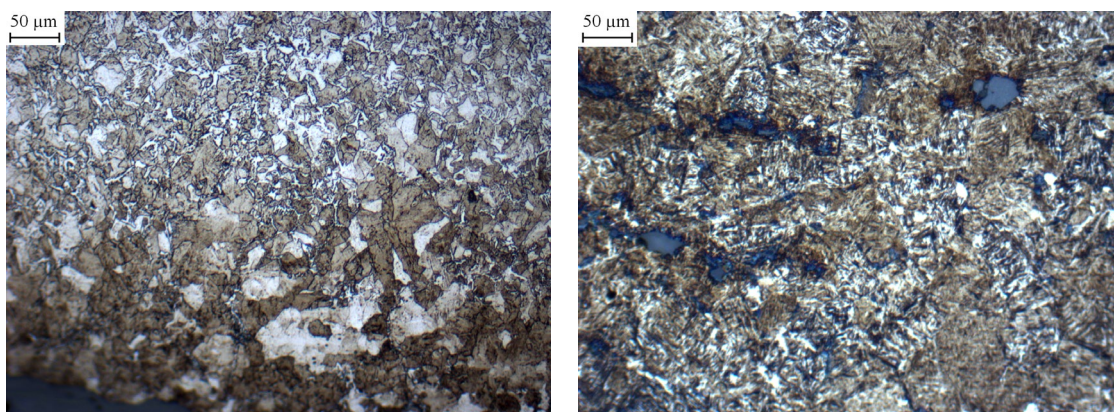


Fig.6 - Microstruttura della lama della spada I, a circa 25 cm dalla guardia (campione I-L2, sezione trasversale, microscopia ottica): microstrutture miste (a, b), inclusioni di scoria (b). - *Microstructure of the blade of sword I, about 25 cm from the guard (specimen I-L2, cross section, optical microscopy): mixed microstructures (a and b), slag inclusions (b).*

Si possono proporre due ipotesi per il ciclo produttivo della lama I: o essa è stata realizzata da un unico pezzo di acciaio che presentava un contenuto di carbonio disomogeneo, derivante dal processo di fabbricazione dell'acciaio stesso; oppure è stata realizzata mediante saldatura alla forgia di più nastri di ferro battuto e di acciaio sovrapposti, con una forgiatura a caldo prolungata che ha consentito una parziale diffusione del carbonio. L'ipotesi del pezzo unico sembra più probabile, perché, come sopra osservato, nelle sezioni esaminate non sono state rilevate linee di giunzione, il gradiente di carbonio generalmente non è ripido e la distribuzione delle regioni a più alto tenore di carbonio non è razionale. È invece pressoché certo che la lama è stata sottoposta ad una tempra incompleta, formando martensite e microstrutture miste, in funzione della velocità di raffreddamento e soprattutto del contenuto di carbonio locale. In particolare, è possibile che la temperatura effettiva di inizio della tempra fosse in alcuni punti ipercritica ed in altri punti intercritica, in funzione del tenore locale di carbonio.

Nonostante ciò, le osservazioni dimostrano che il codolo ha subito un raffreddamento molto più lento, trasformandosi quasi completamente in ferrite e perlite. Questi fatti suggeriscono che, durante la tempra, la lama sia stata tenuta dal suo codolo e che il codolo stesso sia stato tenuto fuori dal mezzo di tempra, nel quale era invece immersa la parte restante

della lama ed in particolare il tagliente. In alternativa è però anche ipotizzabile che il codolo non sia stato austenitizzato insieme alla lama.

Le durezze osservate nella lama implicano, infine, che la lama non è stata rinvenuta ad alta temperatura; non si può tuttavia escludere un leggero autorinvenimento o un rinvenimento a bassa temperatura; quest'ultima ipotesi è corroborata dal fatto che la martensite è facilmente attaccata dal Nital (la martensite fresca è meno sensibile all'attacco con Nital, rispetto ad altri costituenti metallografici, a causa dell'assenza di carburi).

Spada II

Anche la spada II è formata da tre parti fabbricate separatamente, ovvero il pomolo, la guardia e la lama (includente codolo e tagliente).

Il campione II-P è stato ricavato dal pomolo in prossimità della superficie (figure 3). Questo campione ha dimostrato che, almeno nella regione superficiale esaminata, il pomolo presenta ferrite e perlite sferoidizzata (figura 7), con contenuto di carbonio disomogeneo ma in media significativo, riconducibile all'uso di acciaio piuttosto che di ferro battuto. La durezza è compresa tra 125 e 140 HV_{0,1}.

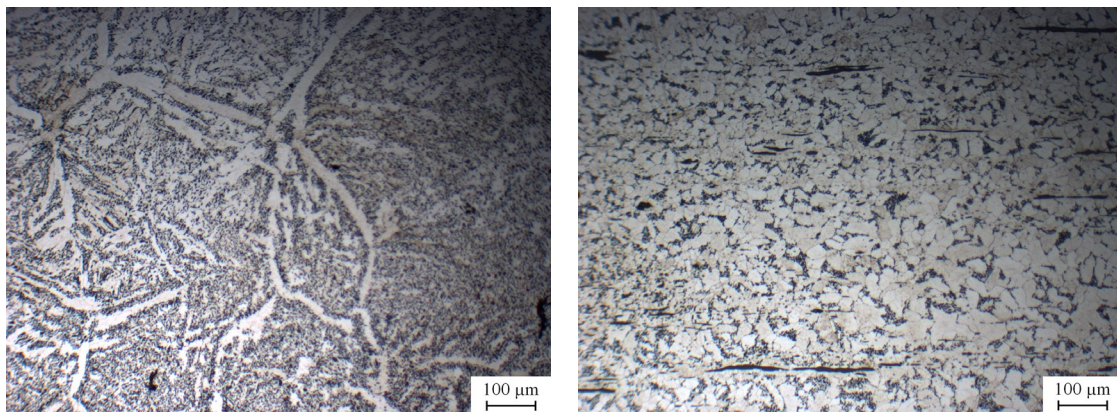


Fig.7 - Microstruttura del pomolo della spada II, in prossimità della superficie esterna (campione II-P, microscopia ottica): ferrite e perlite sferoidizzata, con zone ad alto (a) e basso (b) tenore di carbonio. - *Microstructure of the pommel of sword II, close to the outer surface (sample II-P, optical microscopy): ferrite and spheroidized perlite, with high (a) and low (b) carbon content zones.*

Dunque si può concludere che il pomolo è stato sottoposto ad un trattamento termico equivalente ad una ricottura sub-critica prolungata; ciò potrebbe essere avvenuto a causa o di un raffreddamento particolarmente lento dopo la forgiatura,

per esempio se numerosi pezzi simili furono forgiati uno dopo l'altro ed poi accatastati e raffreddati insieme, o anche a causa di un riscaldamento successivo, forse eseguito per facilitare il montaggio a caldo del pomolo sul codolo.

Il tenore di carbonio del pomolo appare eccessivo e perciò inutilmente dispendioso rispetto allo scopo del componente (il pomolo infatti serve soltanto come contrappeso per arretrare il baricentro della spada); a questo proposito si possono formulare due ipotesi: considerato che il pomolo è un oggetto di piccole dimensioni, come prima ipotesi è possibile che esso sia stato fabbricato con un pezzo di acciaio di recupero, avanzato da altre lavorazioni; oppure in alternativa, considerato che la sezione esaminata è relativamente superficiale, è possibile che il tenore di carbonio riscontrato sia dovuto a carburazione involontaria durante i riscaldamenti (che erano svolti normalmente su un letto di carbonella di legna ad alta temperatura).

Il campione II-G corrispondente all'estremità di un braccio della guardia (figura 3). Dall'esame di questo campione si è dedotto che la guardia è stata fabbricata usando ferro battuto, a bassissimo tenore di carbonio, forse con una piccola deformazione a freddo dopo la forgiatura a caldo (durezza: da 110 a 200 HV_{0,1}).

La lama della spada II è stata esaminata in quattro regioni, corrispondenti ai campioni II-C, II-L1, II-L2 e II-L3 (figura 3). I quattro campioni sono tutti sezioni trasversali complete ed il campione II-L3 corrisponde all'estremità residua della lama spezzata. Scelto come riferimento, anche in questo caso, il margine posteriore della guardia, la sezione metallografica esaminata nel campione II-C, ricavato dal codolo, è circa 5,5 cm dietro alla guardia, mentre le sezioni trasversali esaminate nei campioni II-L1, II-L2 e II-L3, ricavati dal tagliente, si trovano circa 11, 30 e 59 cm davanti alla guardia, rispettivamente.

La sezione trasversale del codolo, dopo l'attacco metallo-

grafico, presenta anch'essa una evidente disomogeneità del tenore di carbonio su grande scala; in particolare l'esame macroscopico evidenzia, nella parte centrale della sezione, quattro bande alterne, due a basso carbonio e due ad alto tenore di carbonio (figura 3, campione II-C); nemmeno in questo caso si rilevano linee di giunzione. L'esame microscopico ottico (figura 7) mostra che la microstruttura del codolo è costituita da ferrite e perlite, con alcune inclusioni di scoria. La durezza è compresa tra 105 e 260 HV. Sia la microstruttura, sia la microdurezza, sono perciò compatibili con un raffreddamento relativamente lento dal campo austenitico (come osservato anche per quanto concerne il codolo della spada I sopra discussa).

L'esame ottico delle sezioni trasversali del tagliente, sia a livello macroscopico (figura 3, campioni II-L1, II-L2, e II-L3) che microscopico (figure 8 e 9), permette di ipotizzare che la lama sia stata fabbricata per saldatura di più strati, perché le transizioni tra regioni a basso e alto tenore di carbonio sono nette e le regioni ad alto carbonio sono disposte razionalmente sui bordi e sulle facce della lama (tenendo conto della perdita di materiale per corrosione), ciò nonostante, nemmeno in questo caso si rilevano linee di giunzione evidenti. Si ipotizza, in particolare, la seguente procedura: un nastro in acciaio ed uno in ferro battuto sono stati saldati insieme; il nastro composito risultante è stato riscaldato in condizioni carburanti; infine il nastro è stato ripiegato e saldato, con il lato in acciaio all'esterno, formando la lama. In questa ipotesi, il sottile strato ad alto tenore di carbonio che si osserva a cuore (figura 3 e figura 8a) può essere spiegato dalla carburazione del lato a basso carbonio durante il riscaldamento precedente all'ultimo passaggio di forgiatura [17].

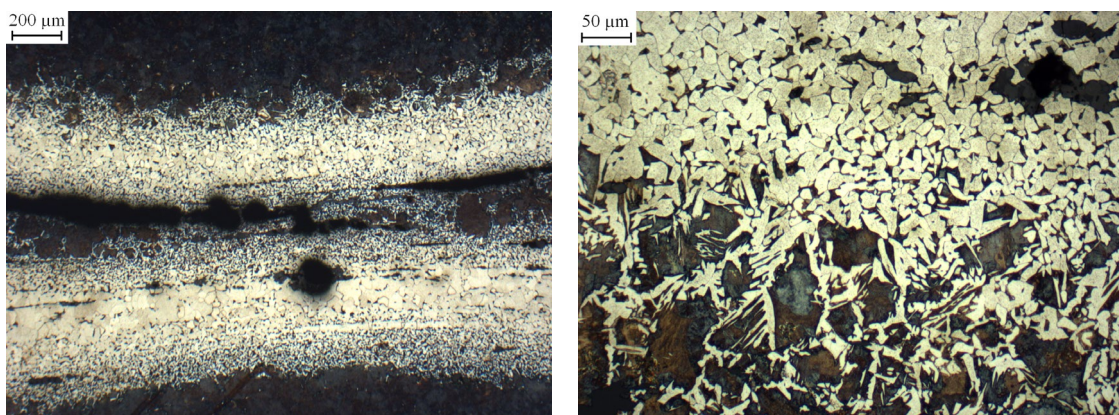


Fig.8 - Microstruttura a bande nella lama della spada II (campione II-L1, sezione trasversale, microscopia ottica): ferrite, perlite fine, martensite. - *Banded microstructure in the blade of sword II (sample II-L1, cross section, light microscopy): ferrite, fine pearlite, martensite.*

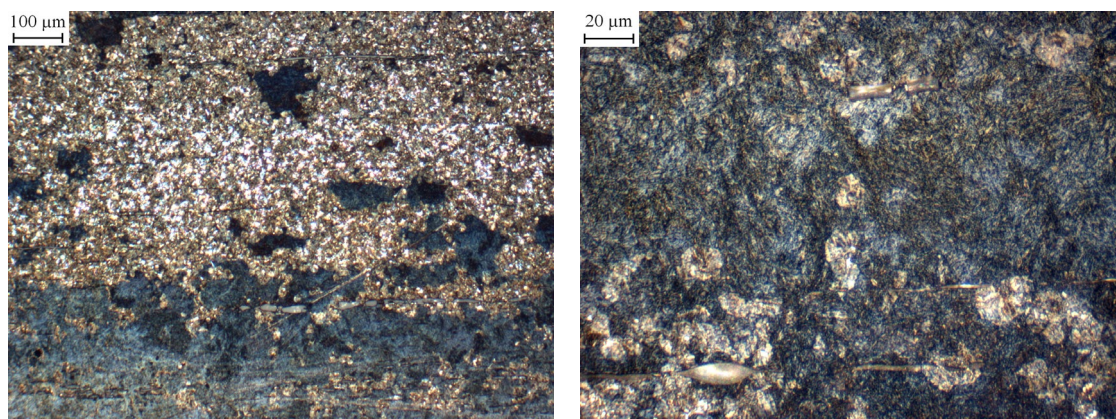


Fig.9 - Microstrutture nella lama della spada II (campione II-L2, sezione longitudinale, microscopia ottica): microstruttura a bande (a), martensite e perlite fine nella regione ad alto tenore di carbonio in prossimità della superficie (b). - *Microstructures in the blade of sword II (sample II-L2, longitudinal section, light microscopy): banded microstructure (a), martensite and fine perlite in the high-carbon region near the surface (b).*

Le stesse analisi, unitamente alle misure di durezza, dimostrano, inoltre, che anche questa lama è stata sottoposta ad una tempra incompleta, conducendo alla formazione di microstrutture miste con ferrite, perlite fine e martensite, con durezza anche molto elevata. In particolare, in tutti i tre campioni ottenuti dal tagliente (II-L1, II-L2 e II-L3) sono stati misurati valori di microdurezza massimi, nelle regioni superficiali a più alto carbonio, compresi tra 540 e 580 HV, accanto a valori di microdurezza minimi, nelle regioni interne a più basso tenore di carbonio, dell'ordine di 120-215 HV. La disomogeneità della microstruttura e della microdurezza si può ricondurre principalmente alla disomogeneità sia della temperatura A3 di austenitizzazione completa, sia della temperabilità, entrambe a loro volta determinate principalmente dalla disomogeneità del tenore di carbonio.

Si conferma quindi anche nella spada II una diversa velocità di raffreddamento finale tra il codolo, probabilmente raffreddato in aria, ed il tagliente, verosimilmente temprato in acqua; anche in questo caso si può dunque ipotizzare che solo la parte tagliente della lama sia stata immersa nel mezzo di tempra, ed il codolo sia stato invece mantenuto al di fuori di esso; oppure, in alternativa, che il codolo non sia stato austenitizzato insieme alla lama.

Anche in questo caso, per le stesse ragioni esposte sopra riguardo alla prima spada, la lama certamente non è stata rinvenuta ad alta temperatura, ma potrebbe aver subito un leggero autorinvenimento ovvero un rinvenimento a bassa temperatura.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Sono state esaminate due spade appartenenti al Museo delle Armi L. Marzoli di Brescia, verosimilmente prodotte in Italia settentrionale alla fine del XV secolo. In considerazione del cattivo stato di conservazione di entrambi i manufatti, è stato autorizzato un esame parzialmente distruttivo. Le analisi metallografiche e le misure di microdurezza svolte hanno permesso di riconoscere i materiali e, almeno in parte, i processi di lavorazione e di trattamento termico impiegati per la loro fabbricazione.

In tutti i manufatti si è osservata la disomogeneità composizionale e microstrutturale tipica dei prodotti dell'epoca ed attribuita in generale al fatto che sia il ferro battuto, sia l'acciaio erano fabbricati allo stato solido o semi-solido, senza che vi fosse la possibilità di omogeneizzare la composizione durante il passaggio allo stato liquido (come è invece oggi normale).

Le analisi svolte permettono di escludere che le spade siano state fabbricate con acciaio al crogiolo (perché quest'ultimo è ipereutetoidico [1,5,10]), confermando così ulteriormente la loro origine occidentale. Purtroppo non è invece possibile, sulla base dei soli risultati qui esposti, stabilire se i materiali impiegati derivassero dal processo di produzione diretta del minerale, oppure da quello di affinamento della ghisa; sono però in corso ulteriori studi rivolti a questo scopo [16].

Gli elementi accessori delle spade, ovvero le guardie ed i pomoli, hanno evidenziato composizioni e microstrutture significativamente diverse tra loro; in particolare una guardia

è risultata esser costituita di acciaio (a medio tenore di carbonio), l'altra di ferro battuto (a basso tenore di carbonio), mostrando entrambe una microstruttura di ferrite e perlite ordinaria; mentre un pomolo, esaminato in una regione superficiale, è risultato costituito anch'esso da acciaio, ma con una microstruttura di ferrite e perlite sferoidizzata. Complessivamente, si ritiene che queste diverse microstrutture siano il risultato accidentale di scelte effettuate allo scopo di produrre questi pezzi in modo semplice ed economico, eventualmente utilizzando anche materiali di recupero e raffreddamenti incontrollati, senza particolare riguardo alle loro proprietà meccaniche, essendo questi componenti o non sollecitati, o comunque molto meno sollecitati delle lame. A conferma di ciò, in questi componenti non si riscontrano evidenze di trattamenti termici finali rivolti a migliorare le proprietà e si osservano in generale valori di durezza limitati e variabili (compresi tra 110 e 295 HV in funzione del tenore locale di carbonio).

In entrambe le lame, invece, si è riscontrato l'uso di acciaio temprato, da solo o in combinazione con ferro battuto. In particolare, il materiale impiegato per fabbricare la lama della prima spada era probabilmente un unico pezzo di acciaio (con le disomogeneità tipiche degli acciai dell'epoca); mentre la lama della seconda spada esaminata fu probabilmente ricavata da una striscia composita con strati di acciaio e di ferro battuto, saldati alla forgia. In questo secondo caso, il procedimento di forgiatura, sopra ipotizzato, dimostra la conoscenza delle diverse proprietà dei due materiali, i quali sono disposti razionalmente (l'acciaio in superficie e sui taglienti, il ferro battuto nel cuore), nonché la capacità di realizzare saldature alla forgia quasi del tutto prive di inclusioni di scoria (verosimilmente mediante l'uso di fondenti per favorire l'eliminazione della scoria stessa); non è tuttavia chiaro se lo scopo precipuo di questa procedura fosse migliorare le prestazioni della lama o minimizzare l'uso dell'acciaio. In entrambe le lame, nella regione dei taglienti, sono state riscontrate microstrutture miste derivanti da una tempra incompleta, principalmente in funzione del tenore locale di carbonio, con valori di durezza massimi, misurati in prossimità delle superfici e del tagliente, molto elevati, fino a 645 - 650 HV nella spada I, e fino a 540 - 575 HV nella spada II. Inoltre, in entrambe le lame si è osservata una microstruttura nettamente diversa nel codolo, il quale, pur essendo prodotto in unico pezzo insieme alla lama, non ha necessità di una durezza altrettanto elevata.

Si ritiene pertanto che le microstrutture riscontrate nei taglienti siano il risultato di trattamenti deliberati e rivolti ad

ottenere le proprietà meccaniche più opportune per l'uso. Non è invece del tutto chiaro se le microstrutture e le proprietà riscontrate nei codoli siano un effetto involontario dei trattamenti eseguiti per migliorare le proprietà dei taglienti, oppure se invece il gradiente di proprietà meccaniche, tra il codolo ed il tagliente, fosse esso stesso un obiettivo del processo produttivo.

In merito al trattamento termico finale, si possono fare sostanzialmente le stesse ipotesi per entrambe le spade.

Una prima ipotesi è che, prima della tempra, fosse austenitizzata solo la parte tagliente della lama, conservando perciò nel codolo la microstruttura ottenuta dal raffreddamento dopo la forgiatura (un processo simile è documentato in Spagna in epoca più tarda [18]).

Una seconda ipotesi è che le spade siano state riscaldate in modo omogeneo e poi temprate immergendo nel fluido di tempra solo il tagliente e trattenendo invece il codolo in aria, al di sopra del mezzo temprante. Ciò permette di spiegare le diverse microstrutture osservate nel tagliente e nel codolo e potrebbe esser stato fatto per due motivi: o semplicemente per ottenere una maggior tenacità nel codolo, oppure per eseguire un processo, più complesso, di tempra parziale ed autorinvenimento. In questa ultima ipotesi, si suppone che le spade fossero estratte dal bagno di tempra prima di essere del tutto fredde, causando un leggero autorinvenimento a bassa temperatura, dovuto alla conduzione del calore dal codolo verso il tagliente e dal cuore verso la superficie. Questa procedura potrebbe esser stata vantaggiosa per la tenacità della lama ed è coerente con le osservazioni fatte, in merito alla possibilità che la lama sia stata rinvenuta a bassa temperatura.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano la Fondazione Brescia Musei, per aver autorizzato l'esame delle due spade; il Dott. Marco Merlo, direttore del Museo delle Armi L. Marzoli, per aver contribuito alla scelta dei reperti, al prelievo dei campioni ed all'esame del loro contesto storico e geografico; gli studenti G. Luparia e M. Orkmez, per aver contribuito alle prove e misure sperimentali nel corso delle loro attività di prova finale e di tirocinio, rispettivamente, svolte presso il Politecnico di Torino.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. R. Williams. The knight and the blast furnace: a history of the metallurgy of armour in the Middle Ages and the early modern period. Brill, Leiden, Olanda, 2003.
- [2] G. Tonelli, M. Faccoli, R. Gotti, R. Roberti, G. Cornacchia. Historical and metallurgical characterization of a "Falchion" sword manufactured in Caino (Brescia, Italy) in the early 17th century AD. *JOM*, 68(8), 2016, 2233-2249.
- [3] B. Barbirol. Metodo di produzione, peso e costo di un'armatura a Brescia nella metà del XVI secolo – due documenti manoscritti del 1549 indirizzati al Duca di Modena. *Armi antiche – Bollettino dell'Accademia di San Marcianno*, Torino, 2016.
- [4] L. Mocarelli, G. Ongaro. Weapons' production in the Republic of Venice in the Early Modern period: the manufacturing centre of Brescia between military needs and economic equilibrium. *Scandinavian Economic History Review*, 65(3), 2017, 231-242.
- [5] R. F. Tylecote. A history of metallurgy. London: Institute of materials, 1992.
- [6] H. G. Brack, Steel- and toolmaking strategies and techniques before 1870, Pennywheel Press, Hulls Cove, USA, 2008
- [7] H. R. Schubert, History of the British iron and steel industry, William Cloves and Sons, London, 1957
- [8] C. S. Smith, A history of metallography: the development of ideas on the structure of metals before 1890. University of Chicago Press, Chicago, USA, 1960
- [9] V. La Salvia. Archaeometallurgy of Lombard swords: from artifacts to a history of craftsmanship. *All'Insegna del Giglio*, Firenze, 1998
- [10] M. Durand-Charre, Damascus and pattern-welded steels: forging blades since the iron age. EDP Sciences, Les Ulis, Francia, 2014
- [11] P. Matteis, G. Scavino. Mechanical performance of historical wrought iron rods. *Archaeometry*, 61(5), 2019, 1053-1065.
- [12] V. Zoppetti, *Arte Siderurgica*, Vol. II, Hoepli, Milano, 1883.
- [13] A. R. Williams, The sword and the crucible: a history of the metallurgy of European swords up to the 16th century. Brill, Leiden, Olanda, 2012.
- [14] F.M. Pranzo. *Armi bresciane dalla raccolta di L. Marzoli*. Palazzolo sull'Oglio, Brescia, 1943.
- [15] L.G. Boccia, E.T. Coelho. *Armi bianche italiane*, Bramante Editrice, Milano, 1975.
- [16] R. Pallaro. *Armi ed armature in acciaio di epoca rinascimentale: caratteristiche metallurgiche e processi di produzione e decorazione*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2020.
- [17] J. D. Verhoeven, A. H. Pendray, W. E. Dauksch. Did the First Iron Blacksmiths Learn to Carburize Iron? Part I: Can Iron be Carburized in a Charcoal-Fired Furnace? *JOM* 68(8), 2016, 2250-2255.
- [18] J. M. P. Valle. Comentarios metalúrgicos a la tecnología de procesos de elaboración del acero de las espadas de Toledo descritas en el documento de Palomares en 1772. *Gladius*, 17, 1986, 129-155.

Metallurgical analysis of two renaissance swords

After a brief introduction to the steelmaking and sword forging techniques, used in northern Italy between the 15th and 16th centuries, two swords manufactured in this historical and geographical context, and preserved at the L. Marzoli Arms Museum in Brescia, Italy, are here examined. Several cross-section specimens were obtained from the pommel, guard, tang, and blade of each sword, and were characterized by means of optical metallography and microhardness testing. The experimental results are reported in detail, and the possible production routes of the examined artifacts are thereafter hypothesized and discussed on the basis of the same results and of the historical techniques.

KEYWORDS: HISTORICAL METALLURGY, SWORDS, XV CENTURY, METALLOGRAPHY, FORGING, HEAT TREATMENT