

Gli acciai inossidabili resistenti all'urto alle basse temperature, impiegati nella costruzione di caldareria saldata

dr. ing. Gabriele DI CAPRIO
dirigente del servizio tecnico del Centro Inox

- Le applicazioni odierne degli acciai inossidabili nel dominio delle basse e bassissime temperature si diffondono sempre più. Tra tutti i diversi tipi di acciai inossidabili, la pratica ha dimostrato che solamente quelli con struttura essenzialmente stabile sono impiegabili con successo nelle applicazioni alle basse temperature, quali ad esempio quelle connesse con la produzione e con l'impiego dell'ossigeno (-196 °C) e dell'idrogeno (-254 °C) liquidi. Tra gli acciai inossidabili, pertanto, sino dalle prime applicazioni, ci si è indirizzati, e con successo, verso quelli a struttura austenitica. In questi acciai, infatti, tale struttura è stabile anche a bassissime temperature. In altre parole gli acciai inossidabili austenitici non presentano quell'intervallo di caduta di resistenza tipico di tutti gli altri acciai alle temperature inferiori allo zero.

Se poi si considera che normalmente questi acciai risultano pure facilmente saldabili e che la loro saldatura ha buone possibilità di resistere agli urti, si comprende facilmente il diffondersi dell'impiego degli stessi in questo campo di applicazione.

INFLUENZA DELLE BASSE TEMPERATURE SUGLI ACCIAI INOSSIDABILI AUSTENITICI

Secondo esperienze condotte da parecchi autori ed i cui risultati sono stati radunati nella tabella II [1, 27, 25], tali acciai (v. tab. I) non risentono, per quanto riguarda lo snervamento e la resistenza a trazione, alcuna variazione negativa; al contrario tali caratteristiche vengono decisamente esaltate.

- Tab. I - Analisi indicativa degli acciai inossidabili austenitici citati nel testo secondo l'unificazione dell'American Iron Steel Institute (AISI) e loro corrispondenza approssimata coll'unificazione nazionale secondo la tabella UNI 4047.

Design. AISI	C max %	Cr %	Ni %	Mn max %	Si max %	P max %	S max %	Altri %	Designazione UNI
302	0,15	17÷19	8÷10	2	1	0,04	0,03	—	X 15 CN 1808
303	0,15	17÷19	8÷10	2	1	0,20	0,15	—	X 15 CNF 1808
304	0,08	18÷20	8÷12	2	1	0,04	0,03	—	X 8 CN 1910
304 L	0,03	18÷20	8÷12	2	1	0,04	0,03	—	X 3 CN 1911
308	0,08	19÷21	10÷12	2	1	0,04	0,03	—	—
310	0,25	24÷26	19÷22	2	1,5	0,04	0,03	—	X 25 CN 2520
321	0,08	17÷19	9÷12	2	1	0,04	0,03	Ti=5×C min	X 8 CNT 1810
347	0,08	17÷19	9÷13	2	1	0,04	0,03	Nb=10×C min	X 8 CN Nb 1811

Tab. II - Caratteristiche meccaniche alle basse temperature di alcuni acciai inossidabili allo stato ricotto.

Acciajo AISI	Temperatura (°C)	Carico di snervamento allo 0,2% (kgf/mm²)	Carico di rottura (kgf/mm²)	Allungamento (*) (%)	Strizione (%)
302	+ 21	25	67	68	—
	- 74	36	112	53	—
	- 196	56	161	35	—
	- 253	88	195	25	—
304	+ 24	23	60	60	70
	- 196	40	145	43	45
	- 254	45	172	48	43
304 L	+ 24	20	60	60	60
	- 196	25	137	42	50
	- 254	28	155	41	57
310	+ 24	32	67	60	65
	- 196	60	111	54	54
	- 254	81	125	56	61
316	+ 21	25	59	70	—
	- 74	34	84	65	—
	- 196	53	130	58	—
	- 253	59	147	55	—
321	+ 21	27	63	60	—
	- 74	35	98	49	—
	- 196	48	147	43	—
	- 253	65	168	35	—
347	+ 24	25	63	50	60
	- 196	29	131	40	32
	- 254	32	147	41	50

(*) Ricavato su lunghezza utile dalla provetta di 50 mm (2 inc).

La duttilità, nonostante subisca delle diminuzioni (vedasi ad esempio il comportamento dell'allungamento a rottura), permane sempre ad un valore elevato.

Per quanto riguarda poi altre caratteristiche fisiche, quali il modulo di

elasticità e, ad esempio, il coefficiente di dilatazione lineare [7], come appare chiaramente nella tabella III tali parametri si può dire rimangano quasi completamente inalterati nonostante la diminuzione della temperatura d'impiego.

Per quanto riguarda poi l'influenza

Tab. III - Valori del coefficiente di dilatazione lineare e nel modulo di elasticità alle basse temperature per alcuni acciai inossidabili allo stato ricotto.

Acciaio AISI	Temperatura (°C)	Coefficiente di dilatazione ($\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Modulo di elasticità (kgf/mm²)
302	- 196	—	19.000
304	- 74 ÷ 21	14,8	—
	- 128 ÷ 21	13,8	—
	- 184 ÷ 21	13,4	—
	- 196	—	18.400
310	- 74 ÷ 21	14	—
	- 128 ÷ 21	13,5	—
	- 184 ÷ 21	12,6	—
347	- 74 ÷ 21	15,3	—
	- 128 ÷ 21	14,6	—
	- 184 ÷ 21	13,5	—
	- 196	—	19.000

Tab. IV - Resistenza all'urto alle basse temperature degli acciai inossidabili austenitici allo stato ricotto. Le prove sono state eseguite su provette tipo Charpy sia con intaglio di tipo «keyhole» sia a V, ricavate da piastre aventi diverse dimensioni e con orientamento secondo la direzione di laminazione o trasversalmente alla stessa.

Acciai AISI	Spessore della piastra (mm)	Orientamento della provetta	Tipo d'intaglio	Temperatura di prova (°C)	Resilienza (ft · lbf)
304	76	long.	K	-196	80
304	76	trasv.	K	-196	80
304	63	trasv.	K	-196	70
304	13	long.	K	-254	80
304	89	long.	V	-254	91,5
304	89	trasv.	V	-254	85
304 L	13	long.	K	-196	73
304 L	13	trasv.	K	-196	43
304 L	89	long.	V	-196	67
304 L	89	long.	V	-254	66
310	89	long.	V	-196	90
310	89	trasv.	V	-196	87
310	89	long.	V	-254	86,5
310	89	trasv.	V	-254	85
347	13	long.	K	-196	60
347	13	trasv.	K	-196	47
347	89	long.	V	-254	59
347	89	trasv.	V	-254	53
347	165	long.	V	-184	77
347	165	trasv.	V	-184	58

delle basse temperature d'impiego sulla resistenza all'urto [8], dobbiamo considerare che sebbene essa sia risentita, come mostra chiaramente la tabella IV (¹), ciononostante rimane sempre elevata, e si mantiene per questi materiali, sperimentati allo stato ricotto, dello stesso ordine di grandezza di quella a temperatura ambiente.

D'altra parte la permanenza prolungata a temperature molto basse non influenza la resistenza all'urto di questi materiali, come mostrano i dati riportati nella tabella V.

Infatti per permanenza a basse temperature (sino a 1 anno) nell'ossigeno

liquido, l'acciaio tipo AISI 304 non presenta sensibili variazioni di resilienza. A questo proposito, d'altronde, vale la pena di ricordare l'esperienza condotta [4] sullo stelo di una valvola di un impianto di produzione di ossigeno liquido, che vi era rimasto immerso per 15 anni consecutivi. Tale stelo era stato costruito con acciaio tipo AISI 303 e aveva denunciato, dopo la permanenza sopra menzionata, una resilienza, misurata con provetta Charpy e intaglio «keyhole», pari a 33 ft · lbf a temperatura ambiente e pari a 25 ft · lbf alla temperatura di -181 °C.

Tab. V - Effetti di esposizione prolungata alle basse temperature sull'acciaio tipo AISI 304. La resistenza all'urto è stata misurata su provette tipo Charpy con intaglio «keyhole».

Tempo di esposizione	Temperatura (°C)	Resilienza (ft · lbf)
0	-196	85
30 min.	-196	72,5
6 mesi	-196	73
12 mesi	-196	75

(¹) Si fa notare che i dati presentati nella tabella IV e seguenti, sono stati ricavati da diversi sperimentatori che hanno impiegato provette di resilienza tipo Charpy con intagli differenti. Più precisamente sono stati impiegati 2 tipi di intaglio: quello a V e quello a «buco di chiave», o secondo la denominazione anglosassone «keyhole», che nel testo viene indicato a volte per semplicità con la lettera K.

Dato che i risultati di tali misure di resilienza erano originariamente espressi in unità anglosassoni (ft · lbf) si è pensato di non procedere alla trasformazione in unità metriche (kgf · cm) dato che tale trasformazione non avrebbe avuto senso, in conseguenza del fatto che il tipo di provetta normalmente impiegato in Italia per tali determinazioni è diverso dai due sopra menzionati. Si è pertanto preferito lasciare indicati i valori nelle unità originali, tenuto presente anche il carattere eminentemente qualitativo e non quantitativo della prova di resilienza.

Per quanto riguarda la resistenza all'urto alle basse temperature, l'esperienza ha sino ad oggi dimostrato che i fattori che influenzano tale parametro sono essenzialmente tre e precisamente:

il contenuto di carbonio all'acciaio; l'incrudimento per lavorazione a freddo;

la presenza di ferrite.

Il contenuto di carbonio agisce nel senso di diminuire, specialmente a temperature molto basse (temperature dell'ossigeno liquido ed inferiori), la resistenza agli urti, data la formazione di carburi nell'interno della matrice austenitica.

Alcuni autori [5] ritengono addirittura che la resistenza agli urti vari in senso inversamente proporzionale alla percentuale di carbonio nell'acciaio, nè, pare, che l'aggiunta di elementi stabilizzanti, quali *Ti* e *Nb*, tenda a modificare tale fenomeno di infragilimento [10].

La deformazione a freddo provoca un incrudimento del materiale, incrudimento che, per così dire, diminuisce la possibilità di deformarsi ulteriormente del materiale stesso. Conseguentemente la resistenza all'urto viene a diminuire, e ciò in proporzione diretta con il grado di incrudimento [3].

La presenza di nuclei sufficientemente numerosi di ferrite ed eventualmente di fase sigma può inoltre favorire la diminuzione della resistenza agli urti.

Ne consegue quindi che la via ideale da battere per ottenere la migliore resistenza agli urti a basse temperature sarebbe quella di indirizzarsi su acciai inossidabili con basso contenuto di car-

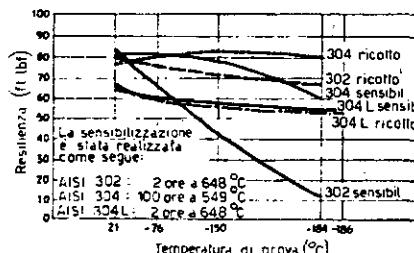


Fig. 1 - Influenza della ricottura e della sensibilizzazione sulla resistenza all'urto degli acciai inossidabili AISI 302 - 304 - 304 L. La resilienza è stata misurata su provette di tipo Charpy con intaglio «keyhole».

bonio con una composizione tale da ottenere una struttura austenitica perfettamente stabile ed inoltre di evitare, per quanto possibile, l'incrudimento del materiale per lavorazione a freddo.

Queste condizioni ovviamente sono assolutamente ideali e quindi non sempre realizzabili in strutture reali. Buona norma è però quella di attenersi per quanto possibile ad acciai con basso tenore di carbonio. Ciò d'altronde spiega il largo impiego in questo settore degli acciai del tipo AISI 304.

EFFETTI DELLE SALDATURE E LO COMPORTAMENTO ALLE BASSE TEMPERATURE

Un primo effetto della saldatura è ovviamente quello di provocare un riscaldamento della zona circostante la saldatura stessa, con pericolo di sensibilizzare il materiale. A questo proposito [8] sono state condotte esperienze su acciai tipo AISI 302, AISI 304, AISI 304 L, le quali hanno posto in luce l'influenza negativa di tale riscaldamento ed inoltre come esso risulti tanto più pernicioso, come del resto già sopra accennato, quanto maggiore è il contenuto di carbonio nell'acciaio (vedasi figura 1).

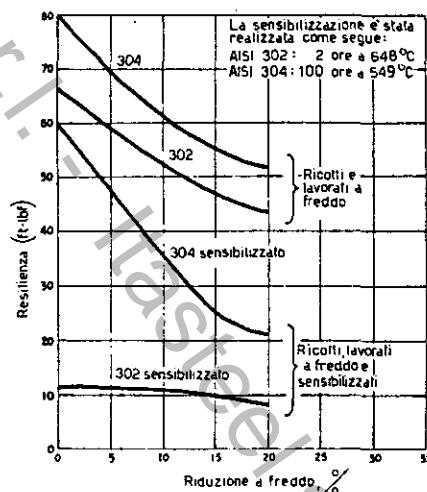


Fig. 2 - Riduzione della resistenza all'urto dovuta ad incrudimento per lavorazione a freddo ed alla sensibilizzazione per acciai inossidabili tipo AISI 302 e 304. La resilienza è stata misurata su provette di tipo Charpy con intaglio «keyhole» alla temperatura di -184°C.

Tab. VI - Comportamento di saldature, eseguite su acciai inossidabili, a temperatura di -196°C . La resistenza all'urto è stata misurata su provette tipo Charpy con intaglio «keyhole».

Acciajo AISI	Elettrodo AISI	Stato	Resilienza	
			a temperatura ambiente (ft · lbf)	a -196°C (ft · lbf)
304	304	saldato	34	20
		saldato e ricotto	45	35
304	308	saldato	32	17
		saldato e ricotto	36,5	30
310	310	saldato	37	23,5
		saldato e ricotto	31	19
347	347	saldato	27	19
		saldato e ricotto	25	18

O A questo proposito è significativo rilevare come l'AISI 304L (a basso carbonio: $C \leq 0,03\%$) presenti caratteristiche di resistenza all'urto immutate, sia allo stato ricotto che sensibilizzato, mentre al contrario il 302 ($C \leq 0,15\%$) accusi un netto decadimento ed il 304 ($C \leq 0,08\%$) possa essere considerato in condizioni intermedie, pur denunciando un comportamento senza dubbio migliore del 302.

Le condizioni di sensibilizzazione sono state:

AISI 302: permanenza di 2 ore a 648°C ;

AISI 304: permanenza di 100 ore a 549°C ;

AISI 304 L: permanenza di 2 ore a 648°C .

O L'effetto dell'incrudimento per lavorazione a freddo e la sovrapposizione della sensibilizzazione all'incrudimento, come in pratica può avvenire, nelle zone delle strutture saldate vicino ai cordoni di saldatura, è rappresentato nel diagramma di fig. 2 [3], in funzione delle riduzioni di sezione effettuate con lavorazione a freddo, per gli acciai AISI 302 e AISI 304 per una temperatura di prova di -184°C .

Come già si era anticipato, il solo incrudimento provoca di per sé un danneggiamento della resistenza agli urti dei due acciai, rispetto allo stato ricotto. Tale decadimento è però ancora più marcato se si considera l'effetto ingenerato sovrapponendo all'incrudimento anche la sensibilizzazione (che già di per sé a queste temperature dà luogo ad un danneggiamento molto severo).

Il comportamento dell'acciaio AISI 302 è in questo caso sintomatico: l'effetto della sensibilizzazione si sovrappone a quello dell'incrudimento in modo così completo che praticamente la resistenza all'urto viene grandemente ridotta (scende all'incirca a 10 ft · lbf) e l'influenza del grado di incrudimento non è quasi più sentita.

Analogo danneggiamento, ma in misura decisamente minore, subisce l'acciaio 304, il quale conserva infatti, anche nella condizione peggiore, un livello di resistenza all'urto apprezzabile (circa 21 ft · lbf). Sono state pure effettuate prove di resilienza su lamiere saldate di diversi acciai inossidabili a struttura austenitica, prelevando le provette nella zona di saldatura [6]. Gli acciai sperimentati sono stati del tipo AISI 304, AISI 310 e AISI 347, operando con diversi elettrodi come illustrato nella tabella VI.

Le prove sono state condotte sia a temperatura di -196°C (ossigeno liquido), sia a temperatura ambiente tanto sul materiale saldato tal quale quanto sullo stesso poi ricotto [6].

E' interessante notare come l'acciaio 347 (stabilizzato al Nb) non mostri di sentire l'effetto della ricottura, sia a temperatura ambiente, sia a -196°C . L'acciaio AISI 310 del pari non mostra di avere benefici da questo trattamento, mentre al contrario l'AISI 304 accusa un sensibile miglioramento della resilienza.

Altre prove, condotte sul solo acciaio AISI 304, hanno permesso di sperimentare diversi elettrodi e diverse tecnologie di saldatura. Le prove sono state condotte a temperatura di -254°C e i

Itasteel S.p.A.

Tab. VII - Resistenza all'urto di provette saldate di acciaio AISI 304 alla temperatura di -254°C . La resilienza è stata misurata su provette tipo Charpy con intaglio «keyhole» e ciascun valore indicato è la media di 4 risultati.

Tipo di elettrodo	Rivestimento dell'elettrodo	Processo di saldatura	Resilienza (ft · lbf)
E 308 - 15 (0,07% C)	basico	manuale all'arco	17
E 310 - 15 (0,11% C)	basico	manuale all'arco	23
E 308 L - 15 (0% ferrite)	basico	manuale all'arco	20
E 308 L - 15 (4% ferrite)	basico	manuale all'arco	27
E 308 L - 16 (4% ferrite)	ossido di titanio	manuale all'arco	27
E 308 L	nessuno	con elettrodo consumabile in gas inerte (*)	37

(*) Il gas inerte di protezione era costituito da una miscela formata da due flussi, uno di argon con portata di $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$ e l'altro di azoto con portata di $0,13 \text{ m}^3/\text{h}$.

risultati sono riportati nella tabella VII.

ESEMPIO DI REALIZZAZIONE DI CONTENITORI SALDATI IN ACCIAIO AISI 304 PER IDROGENO LIQUIDO

Come esempio applicativo di quanto sopra esposto varrà citare la realizzazione di contenitori sferici in acciaio AISI 304 [9], contenitori che dovevano lavorare ad una temperatura di -254°C .

Le dimensioni di tali sfere erano:
diametro interno 1575 mm;
spessore 48 mm.

La pressione di esercizio era di $126,5 \text{ kgf/cm}^2$ e il limite minimo di resilienza richiesta era di $15 \text{ ft} \cdot \text{lbf}$ secondo le norme ASME.

Era inoltre prescritto che il contenuto di carbonio nel cordone di saldatura dovesse essere non superiore a 0,05% e che la percentuale di ferrite dovesse essere del 5-9%. Era prescritto inoltre una assoluta pulizia interna, dato che la cavità della sfera non risultava accessibile dopo saldatura.

Si dovette quindi eseguire la saldatura completamente dall'esterno. Allo scopo di evitare l'introduzione di spruzzi di saldatura nell'interno della sfera,

si provvide a saldare lungo l'equatore di una delle due emisfere costituenti la sfera (sui bordi delle quali si era già provveduto a ricavare di macchina il bisello per la saldatura) un inserto a forma di T rovesciata (vedasi fig. 3).

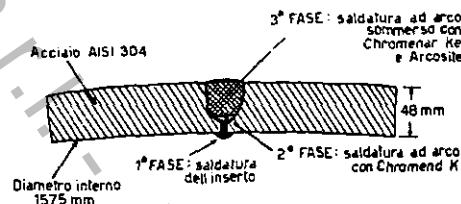


Fig. 3 - Tre fasi delle operazioni di saldatura dall'esterno di sfere in acciaio tipo AISI 304.

Posizionate quindi l'una rispetto all'altra le due semisfere e collegatele mediante robuste sbarre, si provvedeva, sostenendo il complesso con apposita attrezzatura, ad effettuare una prima passata di fondo. In un secondo tempo, sempre usando una attrezzatura manuale di saldatura in atmosfera di argon e con elettrodo di tungsteno, si provvedeva ad effettuare altre 4 passate ottenendo un cordone piatto ed uniforme. Il materiale d'apporto usato in questa fase era del Chromend K

(con composizione indicativa 0,07 % C, 19 % Cr, 9 % Ni e Fe).

La saldatura completa del giunto venne ultimata con parecchie passate eseguite con un elettrodo di tipo AISI 308 di diametro 1/8" (= 3,175 mm) usando una normale attrezzatura di saldatura ad arco sommerso.

Le prove condotte su provette saldate in tali condizioni garantirono eccellenti caratteristiche tra cui una resilienza di $30 \div 35$ ft-lbf alla temperatura di prova di -254°C (provette tipo Charpy con intaglio « keyhole »).

Del pari i contenitori superarono agevolmente la prova di pressione di 190 kgf/cm². Altri contenitori sferici analoghi di dimensioni minori (diametro interno pari a 737 mm e spessore 19 mm) sono stati costruiti impiegando la stessa tecnica realizzata.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mc CONNELL, J. H. & BRADY, R. R.: « Austenitic stainless steels thousands of tons in -300 to -425°F service » in: « Chemical Engineering », 11 luglio 1960.
- [2] RUSSEL, F.: Comunicazione della Union Carbide Metals Co.
- [3] SCHMIDT, E. H.: « Low temperature impact of annealed and sensitized 18/8 » in: « Metal Progress », novembre 1948.
- [4] BINDER, W. O.: « Effect of cold work at low temperature on austenitic 18/8 » in: « Metal Progress », agosto 1960.
- [5] KRAMER, A. & BALDWIN, W. Jr.: « Carbide precipitation and brittleness in austenitic stainless steel » in: ASM Trans, Vol. 50, 1958.
- [6] KRIVOBOK, V. M. & THOMAS, R. D. Jr.: « Impact tests of welded austenitic stainless steels » in: « Welding Research Supplement », settembre 1950.
- [7] FURMAN, D. E.: « Thermal expansion characteristics of stainless steels between -300 and 1.000°F » in: « Journal of Metals », aprile 1950.
- [8] KRIVOBOK, V. M.: « Properties of austenitic stainless steels at low temperatures », NBC, circolare 520.
- [9] ***: « Precise welding simplifies fabrication of spheres for cryogenic testing » in: « Welding Journal », p. 660 \div 661, luglio 1962.
- [10] FAUVEL: « Contribution à l'étude de la fragilité des aciers inoxydables austénitiques 18/8 aux très basses températures » in: « Revue du Nickel », gennaio-febbraio 1963.
- [11] COLOMBIER, L. & HOCHMANN, J.: « Aciers inoxydables, aciers refractaires », 1955.
- [12] ***: « La Metallurgie », vol. 83, n. 1, gennaio 1951.
- [13] BASTIEN, P. & DEDIEU, J.: « Métaux et corrosion », nov. 1951, p. 423.
- [14] BASTIEN, P. & DEDIEU, J.: « C. R. Académies des sciences », 231, p. 862 \div 864, 1950.
- [15] PLATEAU, J. et alii: « Revue universelle des mines », ottobre 1956, n. 10-543.
- [16] BERNARD, J. & MOREAU, J.: « Journal de l'Institut Mét. », p. 83 \div 87, 1954.
- [17] GUESSIER, A. & CASTRO, R.: « Revue de Metallurgie », n. 2, p. 107 \div 123, febbraio 1958.
- [18] PARKER, E. R.: « Symposium on effect of temperature on the brittle behaviour of metals with particular reference to low temperature », ASTM Pubblic., n. 158.
- [19] EICHELMANN, G. & HULL, F. C.: « Trans. ASTM », Vol. 95, p. 77, 1953.
- [20] KRIVOBOK, V. N.: « Bulletin n. 1 de la société royale belge des ingénieurs et des industriels », 1951.
- [21] ***: « What Electrode to use for welding type 347 Stainless » in: « Metal Progress », gennaio 1962.
- [22] TEMPLE, R. W. et alii: « Economic analysis of materials in cryogenic containers » in: « Structures and materials conference, American Rocket Society », aprile 1963 - memoria riportata in « Materials in design eng. », giugno 1963, p. 162 \div 164.
- [23] CAMPBELL, J. C. & RICE, L. P.: « Properties of the precipitation hardening stainless steel and low-alloy high-strength steels at very low temperature », Convegno annuale ASTM, Atlantic City, giugno 1960, memoria riportata in: « Metal Progress », settembre 1962, p. 187 \div 188.
- [24] ESPEY, G. B. et alii: « Some factors influencing the fracture toughness of sheet alloys for use in lightweight cryogenic tankage », Convegno annuale ASTM, Atlantic City, giugno 1961, memoria riportata in: « Metal Progress », maggio 1962, p. 159 \div 160.
- [25] ALLEGHENY & LUDLUM: « Check the cryogenic properties of allegheny stainless and special steels » in: « Materials in design eng. », aprile 1963, p. 37 \div 38.
- [26] INCO: « Bibliography on low temperature characteristics of steel », aprile 1960.
- [27] HUNTER, J. R.: « The low temperature properties of the stainless steels », Allegheny-Ludlum Steel Corp., Pittsburg, 1960.