

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102009901795828A1

Publication Date

20110623

Applicant

CENTRO SVILUPPO MATERIALI S.P.A.

Title

PROCEDIMENTO PER LA PRODUZIONE DI LAMIERINI MAGNETICI
GRANO ORIENTATO.

"PROCEDIMENTO PER LA PRODUZIONE DI LAMIERINI MAGNETICI A GRANO ORIENTATO"

DESCRIZIONE

La presente invenzione si riferisce alla produzione di lamierini di lega a base di ferro
5 contenente silicio per applicazioni elettriche con elevato grado di anisotropia magnetica e caratteristiche magnetiche eccellenti lungo la direzione di laminazione dei nastri, noti come lamierini magnetici a grano orientato.

L'invenzione consiste in un nuovo procedimento per la fabbricazione di detti prodotti per cui, attraverso un particolare controllo del processo termo meccanico di
10 laminazione a caldo, si favoriscono le condizioni per il controllo dei fenomeni di ricristallizzazione secondaria orientata a spessore finale e l'ottenimento di prodotti finiti con caratteristiche magnetiche eccellenti e particolarmente omogenee.

Come è noto, i lamierini magnetici a grano orientato vengono comunemente classificati in a due classi di prodotto che si differenziano per il valore dell' induzione magnetica
15 misurata sotto l' azione di un campo di 800 As/m (B800): lamierini a grano orientato convenzionale (CGO - $B_{800} > 1800$ mT), e lamierini a grano orientato ad alta permeabilità (HGO - $B_{800} > 1900$ mT).

I lamierini magnetici a grano orientato trovano applicazione in particolare nella costruzione dei nuclei dei trasformatori elettrici utilizzati lungo tutto il ciclo di
20 produzione e distribuzione della energia elettrica (dalla centrale di produzione fino alle utenze finali). Le caratteristiche magnetiche qualificanti di questi materiali, oltre alla permeabilità magnetica lungo la direzione di riferimento (curva di magnetizzazione nella direzione di laminazione dei laminati) sono le perdite di potenza, principalmente dissipate sotto forma di calore, per applicazione di un campo elettromagnetico
25 alternato (50 Hz in Europa) nella stessa direzione di riferimento in cui scorre il flusso magnetico ed alle induzioni di lavoro del trasformatore (tipicamente vengono misurate le perdite di potenza ad 1,5 ed 1,7 Tesla). Le eccellenti caratteristiche magnetiche nella direzione di laminazione dei nastri sono il frutto della peculiare struttura policristallina dei prodotti finiti caratterizzata da una distribuzione di cristalli che
30 costituiscono la matrice metallica che sono passanti lo spessore dei lamierini e la cui orientazione cristallografica è tale per cui la direzione $\langle 001 \rangle$ del reticolo di quasi tutti i cristalli presenti (secondo gli indici di Miller) è allineata lungo la direzione di laminazione dei nastri. Poiché la direzione cristallografica $\langle 001 \rangle$ è la direzione di più facile magnetizzazione del reticolo cubico a corpo centrato, questo garantisce

l'ottenimento della migliore permeabilità possibile per il policristallo. Il grado di allineamento relativo tra le direzioni <001> dei singoli cristalli (tra loro e con la direzione di laminazione) in termini di deviazione angolare è direttamente proporzionale alla permeabilità magnetica ottenibile sul prodotto. I prodotti migliori (gradi HGO) presentano la maggior parte dei cristalli con un disorientamento medio entro un cono di dispersione angolare di 3-4 gradi. Nel caso dei prodotti a grano orientato convenzionale (CGO) il cono di dispersione angolare massima entro cui si dispone la maggior parte dei cristalli costituenti il prodotto risulta mediamente di 7-8 gradi.

Tale struttura cristallina dei prodotti si ottiene nella produzione industriale controllando la crescita continua del grano dopo ricristallizzazione del laminati a spessore finale e successivamente una crescita discontinua dei grani nota agli esperti del settore come ricristallizzazione secondaria orientata.

Per la fabbricazione dei lamierini magnetici a grano orientato è necessario regolare la presenza di una quantità e distribuzione di particelle di seconde fasi che rallentano criticamente il movimento dei bordi di grano ad alta temperatura (Inibitori di crescita del grano) e consentono il controllo della ricristallizzazione secondaria orientata.

La quantità di particelle (frazione volumetrica dei precipitati) è determinata dal contenuto di alcuni elementi quali zolfo e/o selenio, azoto che sono potenzialmente in grado di formare solfuri e/o seleniuri e nitruri adeguatamente stabili ad alta temperatura con molti elementi (ad esempio manganese, rame, cromo, alluminio, niobio, titanio, vanadio, etc).

Altre tipologie di particelle non possono essere utilizzate in quanto troppo poco stabili ad alta temperatura (ad esempio carburi) o troppo stabili e per questo non eliminabili dalla matrice alla fine del processo (ad esempio ossidi).

Inoltre, per un controllo efficace della crescita del grano, è importante che le particelle di seconde fasi siano molto piccole e distribuite uniformemente nella matrice.

Una espressione analitica che descrive la intensità della forza frenante del movimento dei bordi di grano è la seguente equazione (1)

$$I_z (cm^{-1}) = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{fv}{\bar{r}}$$

dove fv è la frazione volumetrica di seconde fasi ed $\bar{r}$ è il valore medio della dimensione delle seconde fasi presenti (espresso come raggio equivalente sferico).

Come è noto agli esperti del settore, la fase di processo per cui è critico il controllo della crescita del grano cristallino in questi acciai è quella che va dalla

ricristallizzazione primaria che si realizza sui semiprodotto dopo la laminazione a freddo a spessore finale (tipicamente durante una ricottura continua), alla ricristallizzazione secondaria che si realizza durante la ricottura finale ad alta temperatura (tipicamente una ricottura statica). La forza frenante deve essere tale da agire uniformemente in tutta la matrice e da contenere la crescita del grano di una struttura iniziale di ricristallizzazione primaria con diametro equivalente sferico del medio grano cristallino dell'ordine ad esempio di 5 - 15 μm . Ad una tale struttura cristallina di partenza, compete una tendenza dei bordi di grano a migrare attivati dalla temperatura, e quindi una propensione alla crescita delle dimensioni medie del grano cristallino ricavabile dalla seguente espressione (2)

$$DF = \frac{1}{\phi} - \frac{1}{\phi_{\max}}$$

con "DF" (Driving Force alla crescita) anch'esso esprimibile in cm^{-1} ed in cui ϕ rappresenta la dimensione media del grano espressa in cm e $\phi_{\max}$ la dimensione della classe di grani più grandi della distribuzione sempre espressa in cm (per ambedue si riferisce comunemente ai valori di raggio equivalente sferico rispettivamente della media e della classe dei grani più grandi). I valori di ϕ e $\phi_{\max}$ si possono agevolmente valutare mediante semplici osservazioni della microstruttura al microscopio ottico e nel caso della fabbricazione di lamierini a grano orientato e in assenza di anomale disomogeneità strutturali sono tali per cui "DF" si attesta su valori compresi tra 1000 e 3000 cm^{-1} .

Per contenere una tale tendenza a crescere la forza frenante degli inibitori definita nella equazione (1) deve essere adeguatamente bilanciata regolando la frazione volumetrica dei precipitati e la loro dimensione media.

Nei processi produttivi convenzionali per la fabbricazione dei lamierini a grano orientato le frazioni volumetriche di seconde fasi in matrice metallica tipicamente adottate per il controllo della crescita del grano e della ricristallizzazione secondaria orientata sono dell'ordine di 0,001 - 0,002 (0,1 - 0,2 %) che corrispondono ad esempio alla precipitazione controllata in forma fine di 0,030 % - 0,040 % in peso di zolfo e/o azoto (ad esempio come MnS e AlN).

Data la solubilità di zolfo e azoto in presenza delle adeguate quantità di alluminio e manganese in matrice, per precipitare omogeneamente e in forma fine le suddette seconde fasi è necessario, prima di laminare a caldo il materiale solidificato, riscaldare a temperature molto alte ($> 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$) per sciogliere i solfuri e/o nitruri precipitati

durante il lento raffreddamento dopo solidificazione delle bramme, e precipitarli di nuovo in forma fine durante il rapido raffreddamento sotto deformazione controllata in laminazione a caldo ed eventualmente le successive ricotture dei nastri.

Tale trattamento termico ad alta temperatura impone alti consumi energetici, la
5 necessità di forni di riscaldamento speciali, la presenza di scorie liquide o pastose durante il processo e la conseguente elevata incidenza di difetti superficiali.

Per superare tali inconvenienti sono state proposte ultimamente varie tecniche alternative di produzione.

In WO9846802 e WO9848062, vengono descritti processi di fabbricazione di lamierini
10 a grano orientato che utilizzano la tecnologia in bramma sottile, il controllo del contenuto di Mn, S, (S+Se), Cu, Al, N ed altri elementi potenzialmente coinvolti nella preparazione della distribuzione di inibitori della crescita del grano in forcelle definite in modo da garantire, nell'ambito delle condizioni di riscaldamento attuabili la dissoluzione della frazione precipitata durante il raffreddamento del colato e la precipitazione di solfuri e
15 nitruri in forma fine durante e/o dopo la fase di laminazione a caldo.

In EP0922119 e EP0925376 viene descritta l'adozione di altre composizioni chimiche e cicli di trasformazione successivi con i quali è possibile ottenere industrialmente prodotti di qualità e con buone rese, anche con l'adozione di tecniche di nitrurazione allo stato solido per incrementare la frazione volumetrica di inibitori della crescita del
20 grano prima della ricristallizzazione secondaria orientata.

Varie soluzioni proposte mostrano specifiche accortezze per ottenere, nei vincoli di temperatura massima attuabile per il riscaldamento / omogeneizzazione del materiale solidificato prima della laminazione a caldo, la quantità e distribuzione di inibitori della crescita del grano necessaria al controllo della ricristallizzazione secondaria orientata
25 per l'ottenimento di prodotti con eccellenti caratteristiche magnetiche, in modo da garantire una "Inibizione" della crescita del grano (distribuzione di seconde fasi non metalliche) presente omogeneamente in matrice prima della ricristallizzazione secondaria almeno uguale o maggiore di 1300 cm^{-1} .

Una metodologia alternativa per il controllo della crescita del grano prima e durante la
30 ricristallizzazione secondaria orientata è quella di operare in modo da ridurre la tendenza a crescere del grano cristallino (vedi equazione (2)) ad esempio attraverso la riduzione delle eterogeneità di ricristallizzazione nelle varie fasi del processo produttivo.

Un modo per ottenere, su nastri industriali, strutture di ricristallizzazione primaria
35 omogenee è quello di aumentare il tasso di riduzione a freddo in modo da generare nella struttura deformata alte densità di dislocazioni omogeneamente distribuite in

matrice anche in presenza di strutture di partenza eterogenee. Tale strategia comporta però la necessità di aumentare proporzionalmente lo spessore del nastro a caldo (considerato fisso lo spessore finale di riferimento del prodotto) con un proporzionale aggravio di costi per la laminazione a freddo e di riduzione delle rese fisiche (numero
5 di rotture in laminazione a freddo proporzionalmente più alto nel caso di tassi di riduzione maggiori). Inoltre, come è noto, all'aumentare del tasso di riduzione a freddo applicato, si riduce proporzionalmente la dimensione dei grani di ricristallizzazione primaria. Ciò comporta un aumento della tendenza a crescere del grano (come deducibile dalla relazione (1)) che richiede conseguentemente la gestione di valori più
10 elevati di inibizione della crescita del grano per il controllo della qualità finale dei prodotti.

Alternativamente utilizzando il processo di laminazione a freddo è possibile recuperare omogeneità micro strutturale attuando laminazioni a freddo in più stadi intervallati da ricotture intermedie, anche se con un aumento dei costi di trasformazione.

15 Gli inventori del procedimento secondo la presente invenzione hanno condotto diversi studi sulla possibilità di ridurre la eterogeneità micro strutturali dei laminati a freddo ricristallizzati prodotti durante la fabbricazione di lamierini a grano orientato, regolando le modalità con cui le bramme colate vengono trasformate in nastri. In particolare hanno individuato alcune condizioni operative di laminazione a caldo di bramme
20 mediante le quali è possibile contenere fortemente le eterogeneità di ricristallizzazione dei nastri laminati a caldo con conseguente riduzione della tendenza a crescere del grano ricristallizzato nella ricottura dei nastri a spessore finale che precede il processo di ricristallizzazione secondaria orientata e contestualmente generare una precipitazione fine di seconde fasi utile al controllo della crescita del grano a partire da
25 quantità di zolfo (S) e azoto (N) in matrice più basse rispetto a quanto previsto dalle tecnologie convenzionali e conseguentemente disponibili in soluzione solida metallica prima della laminazione dopo riscaldamento delle bramme a temperature inferiori a 1300 °C. Nel procedimento della presente invenzione, il contenuto di Si deve essere superiore a 2% per poter innalzare la temperatura della ricottura finale statica ai valori necessari
30 per il corretto sviluppo della ricristallizzazione secondaria orientata senza che si realizzino contemporaneamente fenomeni di trasformazione di fase Ferrite-Austenite-Ferrite che compromettono il controllo della microstruttura finale e quindi delle caratteristiche magnetiche dei prodotti finiti con particolare riguardo alla permeabilità magnetica misurata lungo la direzione di laminazione. Per contenuti di Silicio superiori
35 al 4,5 % si riscontra un aumento critico della temperatura di transizione duttile –

fragile del materiale che porta a problemi di resa fisica del processo produttivo fino a rendere non più conveniente la fabbricazione industriale dei prodotti finiti.

Nella presente invenzione il riscaldamento delle bramme necessario per poter laminare a caldo il materiale fino ad ottenere nastri avvolti, viene condotto preferibilmente ad una

5 temperatura non inferiore a 1100 °C e non superiore a 1300 °C.

Temperature di riscaldamento inferiori a 1100 °C, pur se possibili, non sono convenienti in quanto le forze di separazione necessarie per la successiva laminazione a caldo diventano troppo elevate. Temperature di riscaldamento superiori a 1300 °C non portano vantaggi significativi sul processo di laminazione mentre comportano inconvenienti

10 legati alla formazione di ossidazione superficiale eccessiva fino a scoria pastosa o liquida per temperature superiori a 1300 °C, alla movimentazione delle bramme nei forni di riscaldamento a causa della eccessiva duttilità e quindi piegabilità delle bramme sugli appoggi. Inoltre il contenimento delle temperature di processo al di sotto di 1300 °C consente l'utilizzo di forni di riscaldamento di tipo convenzionale e il contenimento dei
15 consumi energetici associati al processo.

La presente invenzione consente il controllo della precipitazione di seconde fasi non metalliche (solfuri, nitruri,...) nella matrice metallica dei nastri a caldo prodotti in densità e dimensioni definite, basato su un processo di laminazione a caldo condotto in
20 almeno due fasi distinte mediante l'adozione di due impianti di laminazione a caldo distinti. Le due fasi di laminazione a caldo sono separate tra loro da uno spazio fisico per cui la prima laminazione a caldo effettuata sul primo laminatoio di sbazzatura produce un semiprodotto che deve essere trasferito, mediante mezzi idonei quali ad esempio una via a rulli, al secondo laminatoio a caldo di finitura che trasforma il semiprodotto (barra) in un laminato a caldo di spessore finale prescritto. Detto
25 laminato a caldo così prodotto viene quindi convenientemente avvolto in forma di nastro e così inviato ai successivi trattamenti termo meccanici prescritti dall'invenzione.

Il trasferimento dello sbazzato dal primo laminatoio al secondo laminatoio deve avvenire in modo che la temperatura di fine laminazione al primo laminatoio sia maggiore o uguale alla temperatura di inizio laminazione al secondo laminatoio. Per
30 limitare il raffreddamento durante il trasferimento dal laminatoio di sbazzatura al laminatoio di finitura, lo spazio tra i due laminatoi può essere protetto da pannelli passivi di isolamento termico.

Il tempo di trasferimento della barra tra la fine della laminazione di sbazzatura e l'inizio della laminazione di finitura deve essere di almeno 5 secondi. Detto tempo minimo è
35 necessario ad attivare nella matrice metallica fenomeni di ricristallizzazione statica prima della seconda laminazione a caldo. Detto tempo di trasferimento comunque non

deve superare i 60 secondi per limitare la indesiderata precipitazione e crescita delle particelle di seconde fasi quali solfuri e nitruri.

La prima laminazione a caldo (sbozzatura) viene realizzata mediante un laminatoio sbozzatore che può essere di tipo reversibile o di tipo continuo con una o più gabbie di laminazione, ed è condotta in modo da preparare un laminato semiprodotto (barra) di spessore non superiore a 40 mm, che prima della seconda fase di laminazione viene mantenuto ad una temperatura superiore a 950 °C e tale da limitare la precipitazione degli elementi potenzialmente in grado di formare nella matrice metallica seconde fasi non metalliche ad una frazione non superiore al 20 %.

E' importante che la temperatura di laminazione di sbozzatura con cui viene prodotta la barra non scenda al di sotto dei 950 °C; infatti gli inventori hanno trovato inaspettatamente che applicando una rapida riduzione complessiva maggiore di 75% nell'intervallo di temperatura prescritto, la precipitazione delle seconde fasi non metalliche dopo la sbozzatura non avviene, anche in condizioni di stabilità termodinamica favorevoli per i precipitati.

Per tassi di riduzione inferiori a 75% una quantità elevata di zolfo e/o azoto precipita sotto forma di solfuri e/o nitruri con dimensioni relativamente troppo elevate a garantire un corretto controllo della crescita del grano (diametro equivalente sferico maggiore di 0,2 µm) alla fine della laminazione di sbozzatura e prima della laminazione di finitura

Una possibile spiegazione di tale comportamento è che per tassi inferiori a 75% e a temperature superiori a 900 °C, i difetti reticolari generati dalla deformazione a caldo permangono nel materiale deformato in quantità relativamente elevata e segregati non omogeneamente in matrice metallica, costituendo i nuclei per una precipitazione localizzata di solfuri e/o nitruri. Nelle stesse condizioni di temperatura e nel caso di deformazioni superiori a 75% vengono altresì favoriti fenomeni di ricristallizzazione che rapidamente eliminano dalla matrice la maggior parte dei difetti reticolari, inibendo la precipitazione delle particelle di solfuro e/o nitruro.

Il secondo processo di laminazione, con cui la barra viene trasformata in nastro a caldo, è condotto in modo da precipitare in forma diffusa, omogeneamente e in piccole dimensioni (preferenzialmente con diametro equivalente sferico minore di 0,2 µm) le seconde fasi potenzialmente precipitabili.

Gli inventori della presente invenzione hanno trovato che lo spessore del materiale a cui si applica la deformazione non deve essere superiore a 40 mm in modo da realizzare, durante il primo passo di riduzione di detta seconda laminazione, due fenomeni contemporanei e sinergici, che sono la generazione molto rapida di una elevata quantità di difetti distribuiti omogeneamente in tutta la matrice metallica e un

veloce raffreddamento del materiale deformato che limita il recupero dinamico dei difetti reticolari generati e aumenta la stabilità termodinamica delle seconde fasi potenzialmente precipitabili. Dette condizioni metallurgiche sono favorite dalla applicazione di una riduzione di spessore realizzata nel primo passaggio della laminazione di finitura maggiore o uguale al 40%.

La seconda laminazione a caldo, detta di finitura, deve essere realizzata in più passi sequenziali distinti, quali ad esempio tre passi sequenziali distinti. Dopo l'esecuzione del primo passo del secondo processo di laminazione a caldo (dove si fa precipitare quasi tutta la frazione di seconde fasi non metalliche precipitabili) il procedimento secondo la presente invenzione prevede l'attuazione di almeno un trattamento termico per completare i processi di precipitazione ed omogeneizzare la distribuzione dimensionale delle inclusioni mediante processi di dissoluzione e crescita dei precipitati attivati dalla temperatura.

Gli inventori del presente procedimento di produzione hanno trovato che detto trattamento termico controllato (in una o più fasi distinte) tra il primo passo e almeno uno dei passi successivi di laminazione, produce una microstruttura dei nastri a caldo maggiormente ricristallizzati rispetto ai casi in cui tali trattamenti termici intermedi non sono attuati o vengono attuati per tempi inferiori a quelli prescritti nella presente invenzione.

Tale trattamento termico può essere realizzato industrialmente utilizzando qualunque tecnica disponibile allo scopo, quali ad esempio stazioni di riscaldamento interposte tra una o più gabbie di laminazione per treni di laminazione di finitura a più gabbie e continui e/o stazioni di riscaldamento posizionate a monte e/o a valle di gabbie di laminatoi di finitura di tipo reversibile. Il trattamento termico può essere attuato con tecniche di riscaldamento diverse quali ad esempio riscaldamento per induzione elettromagnetica o con elementi di riscaldamento radiante inserite in pannelli o camere chiuse.

Oggetto della presente invenzione è un procedimento per la produzione di lamierini magnetici a grano orientato, in cui una bramma di acciaio comprendente, in percentuale in peso, C 0.010-0.100 %, Si 2,0 - 4,5 %, Al 0,005 - 0,050 %, N + S ≤ 0,030 % eventualmente Se tale che $S+(32/79)Se \leq 0,0005 - 0,025\%$; eventualmente almeno un elemento della serie Al, Ti, V, Nb, Zr, B, W per una percentuale in peso complessiva non superiore a 0,035 %; eventualmente almeno uno degli elementi della serie Mn, Cu per una percentuale in peso complessiva non superiore a 0,300 %; ed eventualmente almeno uno degli elementi della serie Sn, As, Sb, P, Bi per una percentuale in peso complessiva non superiore a 0,150 %, il resto essendo ferro a

parte le inevitabili impurezze, viene sottoposta, dopo colaggio e solidificazione, ad un ciclo termo-meccanico comprendente le seguenti operazioni:

- a) riscaldamento ad una temperatura compresa nell'intervallo 1100-1300°C
- b) laminazione a caldo di sbazzatura, in un primo laminatoio di sbazzatura, in
5 almeno due passi di laminazione successivi, fino ad ottenere una barra di spessore non superiore a 40 mm, con tasso di riduzione di spessore totale maggiore del 75% e con temperatura di laminazione maggiore di 950 °C
- c) trasferimento della barra così prodotta dal primo laminatoio di sbazzatura ad un secondo laminatoio di finitura in un tempo compreso tra 5 e 60 secondi
- 10 d) laminazione a caldo di finitura, in un secondo laminatoio di finitura, in almeno due passi di laminazione successivi, il primo passo di laminazione con tasso di riduzione di spessore maggiore del 40 % e temperatura compresa tra 900 e 1100 °C, e l'ultimo passo di laminazione, con tasso di riduzione di spessore minore del 25 % e temperatura non superiore ad 850 °C
- 15 e) essendo il laminato a caldo sottoposto, durante detta laminazione a caldo di finitura, tra il primo passo e almeno uno dei passi successivi di laminazione, ad almeno un trattamento termico nell'intervallo di temperatura compreso tra 800 e 1100 °C e nell'intervallo di tempo compreso tra 10 e 900 secondi.

In una forma di realizzazione del procedimento secondo l'invenzione, la bramma di
20 acciaio da sottoporre a ciclo termo-meccanico contiene Si 2,5 – 3,5% e N 0,002 - 0,006 %.

Il tempo di riscaldamento necessario ai fini della presente invenzione dipende dall'intervallo di temperatura a cui si realizza il trattamento termico ed è regolato secondo il seguente schema :

- 25 t minimo = 10 sec per temperature di riscaldamento $1050^{\circ}\text{C} \leq T < 1100^{\circ}\text{C}$
- t minimo = 20 sec per temperature di riscaldamento $1000^{\circ}\text{C} \leq T < 1050^{\circ}\text{C}$
- t minimo = 60 sec per temperature di riscaldamento $950^{\circ}\text{C} \leq T < 1000^{\circ}\text{C}$
- t minimo = 100 sec per temperature di riscaldamento $900^{\circ}\text{C} \leq T < 950^{\circ}\text{C}$
- t minimo = 300 sec per temperature di riscaldamento $800^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$

30 Per gli scopi dell'invenzione il trattamento termico può essere realizzato in una o più fasi distinte nel corso della laminazione a caldo di finitura nell'ambito dell'intervallo di temperatura prescritto (800-1100°C) nel rispetto di almeno uno dei tempi in temperatura minimi definiti sopra.

Inoltre, nel caso di riscaldi condotti a temperatura superiore a 1000 °C è opportuno
35 limitare il tempo di trattamento termico in temperatura ai valori massimi regolati dal seguente schema :

t massimo = 180 sec per temperature di riscaldamento $1050^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1100^{\circ}\text{C}$

t massimo = 300 sec per temperature di riscaldamento $1000^{\circ}\text{C} \leq T < 1050^{\circ}\text{C}$

t massimo = 600 sec per temperature di riscaldamento $950^{\circ}\text{C} \leq T < 1000^{\circ}\text{C}$

t massimo = 900 sec per temperature di riscaldamento $900^{\circ}\text{C} \leq T < 950^{\circ}\text{C}$

5 t massimo = 900 sec per temperature di riscaldamento $800^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$

Infatti per temperature maggiori di 950°C , tempi di trattamento maggiori di quelli prescritti nello schema sopra indicato possono realizzarsi fenomeni di dissoluzione e crescita delle particelle precipitate difficilmente controllabili in modo riproducibile e generare così livelli di inibizione alla crescita del grano cristallino variabili e tali da produrre instabilità micro strutturale e quindi magnetica dei prodotti finiti, non adeguata ad una produzione industriale. Gli inventori del procedimento secondo la presente invenzione hanno trovato che, per tempi di trattamento inferiori e superiori ai limiti prescritti, le caratteristiche magnetiche dei prodotti peggiorano manifestando una alta instabilità dei risultati.

15 Il nastro laminato a caldo così preparato viene quindi trasformato a prodotto finito con un ciclo di trattamenti comprendente le seguenti fasi di processo:

- o eventuale ricottura continua del nastro a caldo
- o laminazione a freddo a spessore finale in una o più fasi con eventuale ricottura intermedia,
- 20 o ricottura continua di ricristallizzazione primaria ed eventuale decarburazione allo stato solido,
- o ricottura statica ad alta temperatura di ricristallizzazione secondaria orientata,
- o ricottura di termo spianatura e deposizione del rivestimento isolante.

Dopo la termo spianatura e la deposizione del rivestimento isolante, il nastro può essere opzionalmente sottoposto ad un trattamento di raffinamento dei domini magnetici che consiste preferibilmente in tracciatura superficiale laser.

In una variante della presente invenzione, la ricottura di ricristallizzazione dei nastri risultanti dalla laminazione a freddo è condotta in atmosfera nitrurante in modo da aumentare il contenuto medio di azoto dei nastri di una quantità maggiore di 0,001% e preferibilmente compresa tra 0,001% e 0,030%.

30 Lo spessore della brama solidificata può essere compreso tra 50 e 120 mm e preferibilmente la laminazione di finitura è effettuata tramite laminatoio di tipo reversibile.

Si è data finora della presente invenzione una descrizione di carattere generale. Con l'aiuto dei seguenti esempi, illustrativi dell'invenzione e non limitativi della portata della

35

stessa, verrà ora fornita una descrizione di sue forme di realizzazione finalizzate a farne meglio comprendere scopi, caratteristiche, vantaggi e modalità operative.

Esempio 1

5 Un acciaio contenente 3,1% di silicio, 0,058% di carbonio, 0,025% di alluminio, 0,021% di zolfo e 0,0062% di azoto è stata solidificata allo spessore di 100 mm. Tre porzioni del materiale così prodotto sono stati sottoposti a laminazione a caldo nelle condizioni di seguito descritte :

- 10 • Riscaldamento a circa 1150 °C per un tempo di permanenza in forno alla temperatura di trattamento di 20 minuti
- Prima laminazione a caldo di sbazzatura con riduzione di spessore da 100mm a 12mm condotta in modo che l'ultimo passo di riduzione è stato realizzato alla temperatura di 1020 °C
- 15 • Seconda laminazione a caldo di finitura con riduzione di spessore da 12mm a 2,3mm condotta dopo 30 secondi dalla laminazione di sbazzatura in modo che con il primo passo di laminazione lo spessore è passato da 12mm a 5mm e prima di proseguire la laminazione di finitura fino allo spessore finale di 2,3mm i pezzi sono stati mantenuti a 1040 °C per un tempo differente per ognuno dei tre pezzi di prova e rispettivamente di 10 secondi (A) 120 secondi (B) e 480
- 20 secondi (C).

I laminati a caldo così prodotti sono poi stati ricotti a 1080 °C per 20 secondi, laminati a freddo in singolo stadio fino allo spessore di 0,30mm, quindi ricristallizzati in atmosfera decarburante alla temperatura di 850°C per 120 secondi e successivamente ricotti alla stessa temperatura in atmosfera nitrurante per un incremento del contenuto di azoto di

25 circa 150 ppm. I laminati risultanti sono stati sottoposti poi ad una ricottura statica fino alla temperatura di 1200 °C in atmosfera contenente Idrogeno per sviluppare la ricristallizzazione secondaria ed eliminare dalla matrice metallica l'azoto e lo zolfo inizialmente presente nel materiale.

30 Alla fine del processo i lamierini prodotti nelle tre differenti condizioni sono stati sottoposti a misura magnetica. I risultati delle misure sono riportati sinteticamente in Tabella 1

Tabella 1

Condizione	Tempo at 1040 °C	B 800 (Tesla)	P 17 (W/Kg)	
A	10 sec	1,69	2,16	(*)
B	120 sec	1,95	0,97	invenzione
C	480 sec	1,65	2,10	-(*)

(*) esempio comparativo fuori dal campo dell'invenzione

5 **Esempio 2**

Cinque differenti acciai con concentrazioni differenti di zolfo e azoto e alluminio sono stati fabbricati per un esperimento comparativo. In Tabella 2 sono riportate le composizioni chimiche delle cinque leghe prodotte.

10

Tabella 2

Elemento	Acciaio 1	Acciaio 2	Acciaio 3	Acciaio 4	Acciaio 5
	% p/p	% p/p	% p/p	% p/p	% p/p
Si	3,500	3,450	3,450	3,410	3,430
C	0,075	0,070	0,073	0,069	0,071
Al	0,230	0,120	0,235	0,004	0,220
Mn	0,058	0,061	0,060	0,061	0,059
Cu	0,100	0,110	0,100	0,100	0,095
Ti	0,003	0,002	0,004	0,003	0,003
Sn	0,090	0,090	0,090	0,089	0,085
S	0,006	0,014	0,025	0,014	0,035
N	0,009	0,007	0,010	0,007	0,005

I cinque acciai prodotti sono stati solidificati in bramme di spessore 200 mm e quindi tutti laminati a caldo secondo il seguente ciclo :

- 15 • Riscaldamento a 1280 °C per un tempo di permanenza in forno alla temperatura di trattamento di 15 minuti
- Prima laminazione di sbazzatura con riduzione di spessore da 200mm a 23mm e condotta in modo che l'ultimo passo di riduzione è stato realizzato alla temperatura di 1150 °C
- 20 • Seconda laminazione a caldo di finitura con riduzione di spessore da 23mm a 2,1mm condotta dopo 30 secondi dalla laminazione di sbazzatura e in modo che con il primo passo di laminazione lo spessore è passato da 23mm a 13mm e prima di proseguire la laminazione di finitura fino allo spessore finale di 2,1mm i pezzi sono stati mantenuti a 1090 °C per 120 secondi
- 25 • I laminati a caldo così prodotti sono poi stati ricotti a 1050 °C per 20 secondi, laminati a freddo in singolo stadio fino allo spessore di 0,27mm, quindi ricristallizzati in atmosfera decarburante alla temperatura di 850°C per 180 secondi e sottoposti poi ad una ricottura statica fino alla temperatura di 1200 °C in atmosfera contenente Idrogeno per sviluppare la ricristallizzazione secondaria
- 30 ed eliminare dalla matrice metallica l'azoto e lo zolfo inizialmente presente nel materiale.

Alla fine del processo i lamierini prodotti a partire dalle cinque differenti leghe sono stati sottoposti a misura magnetica. I risultati delle misure sono riportati sinteticamente in Tabella 3

5

Tabella 3

Acciaio	S+N	Al	B 800 (Tesla)	P 17 (W/Kg)	
1	0,015	0,230	1,92	0,83	invenzione
2	0,020	0,120	1,91	0,85	invenzione
3	0,035	0,235	1,65	2,10	(*)
4	0,020	0,004	1,62	2,20	(*)
5	0,040	0,220	1,65	2,06	(*)

(*) esempio comparativo fuori dal campo dell'invenzione

Esempio 3

- 10 Un acciaio contenente 3,2% di silicio, 0,065% di carbonio, 0,029% di alluminio, 0,008% di zolfo e 0,007% di azoto è stata solidificata allo spessore di 200 mm. Dopo solidificazione differenti porzioni del materiale colato sono state laminate a caldo secondo cicli termo-meccanici differenti a partire da un riscaldamento in forno alla temperatura 1200 °C per un tempo di permanenza alla temperatura di trattamento di
- 15 15 minuti. Un primo gruppo di pezzi è stato sottoposto ad una laminazione di sbozzatura con riduzione di spessore da 200mm a 55mm (gruppo A), per un secondo gruppo la riduzione di spessore è stata da 200mm a 45 mm (gruppo B), per un terzo gruppo la riduzione di spessore è stata da 200mm a 35mm (gruppo C) e per un terzo gruppo la riduzione di spessore è stata da 200mm a 20mm (gruppo D). Tutte le
- 20 laminazioni di sbozzatura sono state condotte in modo che l'ultimo passo di riduzione fosse realizzato in un intervallo di temperatura tra 1050 °C e 950 °C. Tutti i pezzi sono stati quindi sottoposti ad una successiva seconda laminazione a caldo di finitura entro un tempo pari 50 secondi con riduzione di spessore rispettivamente da 55mm, 45mm, 35 mm e 20mm fino a laminati a caldo di spessore 2,3mm. Nel caso degli
- 25 sbozzati a 55 mm lo spessore dopo il primo passo di laminazione è stato compreso tra 25 e 28 mm; nel caso degli sbozzati a 45mm lo spessore dopo il primo passo di laminazione è stato compreso tra 20 e 22 mm; nel caso degli sbozzati a 35 mm lo spessore dopo il primo passo di laminazione è stato compreso tra 13 e 15 mm, mentre nel caso degli sbozzati a 20 mm lo spessore dopo il primo passo di laminazione è
- 30 stato compreso tra 8 e 9 mm. Immediatamente prima di proseguire la laminazione di finitura fino allo spessore finale di 2,3mm (uguale per tutti) ognuno dei pezzi di prova è stato trattato in un forno alla temperatura di 980 °C per un tempo in temperatura di 300 secondi.

I laminati a caldo così prodotti sono stati poi laminati a freddo una prima volta a spessore di 1,2 mm, ricotti a 1000 °C per 40 secondi e laminati a freddo una seconda volta allo spessore di 0,23 mm.

I laminati a freddo a spessore finale sono stati quindi ricotti in atmosfera decarburante alla temperatura di 860°C per 90 secondi e successivamente ricotti alla stessa temperatura in atmosfera nitrurante per un incremento del contenuto di azoto compreso tra 150 – 200 ppm e infine sottoposti poi ad una ricottura statica alla temperatura massima di 1200 °C per 10 ore.

Alla fine del processo i lamierini prodotti nelle tre differenti condizioni sono stati sottoposti a misura magnetica. I risultati delle misure sono riportati sinteticamente in Tabella 4.

Tabella 4

Condizione	Spessore Barra	Riduzione alla sbozzatura	Riduzione al 1° passo di finitura	B800	P17 (50Hz)	
	mm	%	%	Tesla	W/Kg	-(*)
Gruppo A – prova 1	55	72,5	54	1,63	1,98	--(*)
Gruppo A – prova 2	55	72,5	49	1,65	2,03	(*)
Gruppo A – prova 3	55	72,5	50	1,62	2,10	-(*)
Gruppo B – prova 1	45	77,5	51	1,83	1,25	-(*)
Gruppo B – prova 2	45	77,5	55	1,75	1,52	-(*)
Gruppo B – prova 3	45	77,5	53	1,65	1,98	-(*)
Gruppo C – prova 1	35	82,5	60	1,81	0,85	invenzione
Gruppo C – prova 2	35	82,5	63	1,91	0,83	invenzione
Gruppo C – prova 3	35	82,5	57	1,90	0,84	invenzione
Gruppo D – prova 1	20	90	55	1,92	0,82	invenzione
Gruppo D – prova 2	20	90	60	1,92	0,82	invenzione
Gruppo D – prova 3	20	90	57	1,92	0,83	invenzione

(*) esempio comparativo fuori dal campo dell'invenzione

Esempio 4

Un acciaio contenente 3,2% di silicio, 0,032% di carbonio, 0,015% di alluminio, 0,068% di manganese, 0,085% di rame, 0,0140% di zolfo e 0,0080% di azoto è stata solidificata allo spessore di 70 mm. Dopo un riscaldamento a circa 1290 °C per un tempo di permanenza in forno di 15 minuti alla temperatura di trattamento, il materiale prodotto è stato laminato a caldo in differenti condizioni.

Una prima parte del materiale (A) è stata laminata a caldo operando una prima laminazione di sbazzatura da 70 mm a 15 mm con tre passi di riduzione con una temperatura di fine laminazione di 900 °C e dopo 40 secondi una successiva seconda laminazione di finitura da 15 mm a 2,3 mm in tre passi di riduzione ; tra il primo e il secondo passo e tra il secondo e il terzo passo di detta laminazione di finitura i semiprodotto in laminazione sono stati riscaldati e mantenuti alla temperatura di 940 °C per 90 secondi tra il primo e il secondo passo e alla temperatura di 910 °C per 90 secondi tra il secondo e il terzo passo.

Una seconda parte del materiale (B) è stata laminata a caldo operando una prima laminazione di sbazzatura da 70 mm a 15 mm con tre passi di riduzione con una temperatura di fine laminazione di 1050 °C e dopo 40 secondi e una successiva seconda laminazione di finitura da 15 mm a 2,3 mm in tre passi di riduzione; tra il primo e il secondo passo e tra il secondo e il terzo passo di detta laminazione di finitura i semiprodotto in laminazione sono stati riscaldati e mantenuti alla temperatura di 940 °C per 30 secondi tra il primo e il secondo passo e alla temperatura di 910 °C per 30 secondi tra il secondo e il terzo passo.

Una terza parte del materiale (C) è stata laminata a caldo operando una prima laminazione di sbazzatura da 70 mm a 15 mm con tre passi di riduzione con una temperatura di fine laminazione pari a 900 °C e dopo 40 secondi una successiva seconda laminazione di finitura da 15 mm a 2,0 mm in tre passi di riduzione; tra il primo e il secondo passo e tra il secondo e il terzo passo di detta laminazione di finitura i semiprodotto in laminazione sono stati riscaldati e mantenuti alla temperatura di 940 °C per 90 secondi tra il primo e il secondo passo e alla temperatura di 910 °C per 90 secondi tra il secondo e il terzo passo.

I laminati a caldo così prodotti sono poi stati quindi ricotti a 1000 °C per 30 secondi, laminati a freddo in singolo stadio fino allo spessore di 0,35 mm, quindi ricristallizzati in atmosfera decarburante alla temperatura di 850°C per 90 secondi e sottoposti poi ad una ricottura statica fino alla temperatura di 1200 °C in atmosfera contenente Idrogeno.

Alla fine del processo i lamierini prodotti con le due differenti condizioni di laminazione a caldo sono stati sottoposti a misura magnetica. I risultati delle misure sono riportati sinteticamente in Tabella 5.

5

Tabella 5

Condizione	Temperatura di fine Sbozzatura (°C)	B 800 (Tesla)	P 17 a 50 Hz (W/Kg)	
A	900	1,65	2,45	--(*)
B	1050	1,75	2,01	--(*)
C	1050	1,92	1,10	invenzione

(*) esempio comparativo fuori dal campo dell'invenzione

RIVENDICAZIONI

1 - Procedimento per la produzione di lamierini magnetici a grano orientato, in cui una
bramma di acciaio consistente di, in percentuale in peso, C 0.010-0.100 %, Si 2,0 -
4,5 %, Al 0,005 - 0,050 %, N + S $\leq$ 0,030 % eventualmente Se tale che S+(32/79)Se
5 0,0005 - 0,025%; eventualmente almeno un elemento della serie Al, Ti, V, Nb, Zr, B,
W per una percentuale in peso complessiva non superiore a 0,035 %; eventualmente
almeno uno degli elementi della serie Mn, Cu per una percentuale in peso complessiva
non superiore a 0,300 %; ed eventualmente almeno uno degli elementi della serie Sn,
As, Sb, P, Bi per una percentuale in peso complessiva non superiore a 0,150 %, il
10 resto essendo ferro a parte le inevitabili impurezze, viene sottoposta, dopo colaggio e
solidificazione, ad un ciclo termo-meccanico comprendente le seguenti operazioni:

- a) riscaldamento ad una temperatura compresa nell'intervallo 1100-1300°C
- b) laminazione a caldo di sbazzatura, in un primo laminatoio di sbazzatura, in
almeno due passi di laminazione successivi, fino ad ottenere una barra di
15 spessore non superiore a 40 mm, con tasso di riduzione di spessore totale
maggiore del 75 % e con temperatura di laminazione maggiore di 950 °C.
- c) trasferimento della barra così prodotta dal primo laminatoio di sbazzatura ad un
secondo laminatoio di finitura in un tempo compreso tra 5 e 60 secondi.
- d) laminazione a caldo di finitura, in un secondo laminatoio di finitura, in almeno
20 due passi di laminazione successivi, il primo passo di laminazione con tasso di
riduzione di spessore maggiore del 40 % e temperatura compresa tra 900 e
1100 °C, e l'ultimo passo di laminazione, con tasso di riduzione di spessore
minore del 25 % e temperatura non superiore ad 850 °C.
- e) essendo il laminato a caldo sottoposto, durante detta laminazione a caldo di
25 finitura, tra il primo passo e almeno uno dei passi successivi di laminazione, ad
almeno un trattamento termico nell'intervallo di temperatura compreso tra 800 e
1100 °C e nell'intervallo di tempo complessivo compreso tra 10 e 900 secondi.

2 - Procedimento secondo la rivendicazione 1, in cui la bramma di acciaio da
sottoporre a ciclo termo-meccanico contiene Si 2,5 - 3,5% e N 0,002 - 0,006 %.

30 3 - Procedimento secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui il laminato a caldo viene
sottoposto a trattamento termico nell'intervallo di temperatura 800 - 1100°C per un
tempo minimo di permanenza complessivo regolato secondo il seguente schema:

- t minimo = 10 sec per temperature di riscaldamento $1050^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1100^{\circ}\text{C}$
- t minimo = 20 sec per temperature di riscaldamento $1000^{\circ}\text{C} \leq T < 1050^{\circ}\text{C}$
- 35 t minimo = 60 sec per temperature di riscaldamento $950^{\circ}\text{C} \leq T < 1000^{\circ}\text{C}$
- t minimo = 100 sec per temperature di riscaldamento $900^{\circ}\text{C} \leq T < 950^{\circ}\text{C}$

t minimo = 300 sec per temperature di riscaldamento $800^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$

4. Procedimento secondo la rivendicazione 1, 2 o 3, in cui il laminato a caldo viene sottoposto a detto trattamento termico per un tempo massimo di permanenza complessivo regolato secondo il seguente schema:

- 5 t massimo = 180 sec per temperature di riscaldamento $1050^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1100^{\circ}\text{C}$
- t massimo = 300 sec per temperature di riscaldamento $1000^{\circ}\text{C} \leq T < 1050^{\circ}\text{C}$
- t massimo = 600 sec per temperature di riscaldamento $950^{\circ}\text{C} \leq T < 1000^{\circ}\text{C}$
- t massimo = 900 sec per temperature di riscaldamento $900^{\circ}\text{C} \leq T < 950^{\circ}\text{C}$
- t massimo = 900 sec per temperature di riscaldamento $800^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$

10 5. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il nastro laminato a caldo viene trasformato a prodotto finito con un ciclo di trattamenti comprendente le seguenti fasi di processo:

- o eventuale ricottura continua del nastro a caldo
- o laminazione a freddo a spessore finale in una o più fasi con eventuale ricottura
- 15 intermedia,
- o ricottura continua di ricristallizzazione primaria ed eventuale decarburazione allo stato solido,
- o ricottura statica ad alta temperatura di ricristallizzazione secondaria orientata,
- o ricottura di termo spianatura e deposizione del rivestimento isolante.

20 6. Procedimento per la produzione di lamierini magnetici a grano orientato secondo la rivendicazione 5, in cui dopo la termo spianatura e deposizione del rivestimento isolante, il nastro è sottoposto ad un trattamento di affinamento dei domini magnetici.

7. Procedimento secondo la rivendicazione 6, in cui il trattamento di affinamento dei domini magnetici consiste in tracciatura superficiale laser.

25 8. Procedimento per la produzione di lamierini magnetici a grano orientato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 5 a 7, in cui prima della ricottura statica ad alta temperatura di ricristallizzazione secondaria viene effettuato un trattamento termico di nitrurazione per introdurre nei nastri una quantità di azoto compresa tra 10 e 300 ppm.

9. Procedimento per la produzione di lamierini magnetici a grano orientato secondo
30 una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui lo spessore della brama solidificata è compreso tra 50 e 120 mm.

10. Procedimento per la produzione di lamierini magnetici a grano orientato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la laminazione di finitura è effettuata tramite laminatoio di tipo reversibile.

CLAIMS

- 1 - A process for the production of grain-oriented magnetic sheets, wherein a slab made of steel comprising, in percent by weight, C 0.010-0.100 %, Si 2.0 - 4.5 %, Al 0.005 - 0.050 %, N + S $\leq$ 0.030 % is subjected, after casting and solidification, to a thermo-mechanical cycle comprising the following operations:
 - a) heating to a temperature comprised in the range of 1100-1300°C
 - b) cogging hot-rolling, in a first cogging mill, in at least two subsequent rolling steps, until obtaining a bar of a thickness no greater than 40 mm, with a total thickness reduction rate greater than 75% and with a rolling temperature higher than 950 °C.
 - c) transferring the bar thus made from the first cogging mill to a second finishing mill in a time comprised between 5 and 60 seconds.
 - d) finishing hot-rolling, in a second finishing mill, in at least two subsequent rolling steps, the first rolling step with a thickness reduction rate greater than 40 % and a temperature comprised between 900 and 1100 °C, and the last rolling step, with a thickness reduction rate lower than 25% and a temperature no greater than 850 °C.
 - e) the hot-rolled section being subjected, during said finishing hot-rolling, between the first step and at least one of the subsequent rolling steps, to at least one thermal treatment in the temperature range comprised between 800 and 1100 °C and in the overall time interval comprised between 10 and 900 seconds.
- 2 - The process according to claim 1, wherein the steel slab to be subjected to a thermo-mechanical cycle contains: C 0.010 - 0.100%; Si 2.5 – 3.5%; S+(32/79)Se 0.005 - 0.025%; N 0.002 - 0.006 %; at least one element of the series Al, Ti, V, Nb, Zr, B, W for an overall percent by weight no greater than 0.035 %; at least one of the elements in the series Mn, Cu for an overall percent by weight no greater than 0.300 %; and optionally at least one of the elements in the series Sn, As, Sb, P, Bi for an overall percent by weight no greater than 0.150 %, the remaining part being, unavoidable impurities apart, iron.
- 3 - The process according to claim 1 or 2, wherein the hot-rolled section is subjected to thermal treatment in the temperature range 800 – 1100°C for an overall minimum staying time set according to the following scheme:

$t_{\min} = 10 \text{ s}$	for heating temperatures $1050^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1100^{\circ}\text{C}$
$t_{\min} = 20 \text{ s}$	for heating temperatures $1000^{\circ}\text{C} \leq T < 1050^{\circ}\text{C}$
$t_{\min} = 60 \text{ s}$	for heating temperatures $950^{\circ}\text{C} \leq T < 1000^{\circ}\text{C}$
$t_{\min} = 100 \text{ s}$	for heating temperatures $900^{\circ}\text{C} \leq T < 950^{\circ}\text{C}$

$t_{\min} = 300 \text{ s}$ for heating temperatures $800^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$

4. The process according to claim 1, 2 or 3, wherein the hot-rolled section is subjected to said thermal treatment for an overall maximum staying time set according to the following scheme:

5 $t_{\max} = 180 \text{ s}$ for heating temperatures $1050^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1100^{\circ}\text{C}$

$t_{\max} = 300 \text{ s}$ for heating temperatures $1000^{\circ}\text{C} \leq T < 1050^{\circ}\text{C}$

$t_{\max} = 600 \text{ s}$ for heating temperatures $950^{\circ}\text{C} \leq T < 1000^{\circ}\text{C}$

$t_{\max} = 900 \text{ s}$ for heating temperatures $900^{\circ}\text{C} \leq T < 950^{\circ}\text{C}$

$t_{\max} = 900 \text{ s}$ for heating temperatures $800^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$

10 5. The process according to any one of the preceding claims, wherein the hot-rolled strip is turned into a finished product with a treatment cycle comprising the following process stages:

- optional continuous annealing of the hot strip
- cold-rolling to a final thickness, in one or more stages, with optional
- 15 intermediate annealing,
- continuous primary recrystallisation annealing and optional solid-state decarburizing,
- high-temperature static annealing for oriented secondary recrystallisation,
- thermal flattening annealing and deposition of insulating coating.

20 6. The process for the production of grain-oriented magnetic sheets according to claim 5, wherein after the thermal flattening and deposition of insulating coating, the strip is subjected to a treatment for magnetic domain refinement.

7. The process according to claim 6, wherein the treatment for magnetic domain refinement consists in a laser surface tracing.

25 8. The process for the production of grain-oriented magnetic sheets according to any one of the claims 5 to 7, wherein prior to the high-temperature static annealing for secondary recrystallisation a thermal nitriding treatment is carried out for introducing in the strips a Nitrogen amount comprised between 10 and 300 ppm.

9. The process for the production of grain-oriented magnetic sheets according to any

30 one of the preceding claims, wherein the thickness of the solidified slab is comprised between 50 and 120 mm.

10. The process for the production of grain-oriented magnetic sheets according to any one of the preceding claims, wherein the finishing rolling is carried out by a reversible mill.