

.....

6 WARMTEBEHANDELINGEN VAN STAAL

6.1 Koolstof in staal, het ijzer-koolstofdiagram

- 6.1.1 Ferriet
- 6.1.2 Austeniet
- 6.1.3 Cementiet
- 6.1.4 Perliet
- 6.1.5 Martensiet

6.2 Harden en veredelen

- 6.2.1 Martensietharden
- 6.2.2 Kritische afkoelsnelheid
- 6.2.3 Invloed van legeringselementen
- 6.2.4 Veredelen
- 6.2.5 Ontlaatbrosheid

6.3 Invloed van legeringselementen op het hardings- en veredelingsgedrag van staal

- 6.3.1 Silicium
- 6.3.2 Mangaan
- 6.3.3 Nikkel
- 6.3.4 Kobalt
- 6.3.5 Aluminium
- 6.3.6 Chroom
- 6.3.7 Molybdeen
- 6.3.8 Wolfraam
- 6.3.9 Vanadium
- 6.3.10 Tantaal, titaan en niobium

6.4 Oppervlakteharden

- 6.4.1 Vlamharden
- 6.4.2 Inductieharden
- 6.4.3 Invloed van frequentie en vermogensdichtheid
- 6.4.4 Laserharden en elektronenstraalharden

6.5 Warmtebehandelingen waarbij de samenstelling van het oppervlak verandert

- 6.5.1 Carboneren
- 6.5.2 Carboneren in kisten
- 6.5.3 Zoutbadcarboneren
- 6.5.4 Gascarboneren
- 6.5.5 Ontkolen

6.6 Nitreren

- 6.6.1 Gasnitreren
- 6.6.2 Zoutbadnitreren
- 6.6.3 Ionitreren
- 6.6.4 Nitreren door ionenimplantatie

6.7 **Zacht nitreren**

6.7.1 Carbonitreren

6.7.2 Teniferen

6.8 **Enige andere aanverwante processen**

6.8.1 Sulfineren

6.8.2 Siliceren

6.8.3 Boreren

6.9 **Andere door warmte uitgevoerde processen**

6.9.1 Vlamreinigen

6.9.2 Thermisch ontbramen

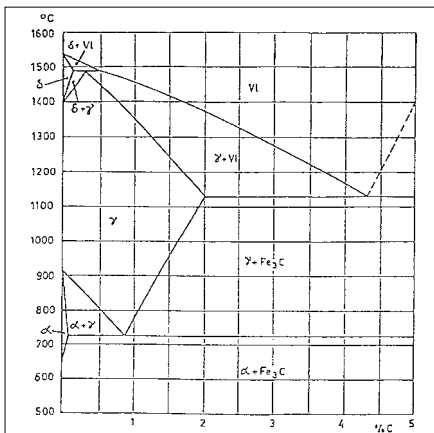
6 **WARMTEBEHANDELINGEN VAN STAAL**

Staal, het meest gebruikte metaal kan door warmtebehandelingen belangrijke veranderingen ondergaan, waardoor het een grotere sterkte, een veel grotere hardheid en een goede slijtvastheid verkrijgt. Dit is het harden en in het bijzonder het oppervlakteharden van staal.

Wij bespreken in dit hoofdstuk eerst de warmtebehandelingen, waarbij de samenstelling van het staal niet verandert en vervolgens behandelingen, waarbij *niet-metaal* in het staaloppervlak wordt gebracht, waardoor nuttige eigenschappen worden verkregen. Daarbij wordt vooral gedacht aan het inbrengen van koolstof of stikstof in het staaloppervlak, maar er zijn ook andere mogelijkheden.

Diffusiebewerkingen waarbij andere metalen in het oppervlak van staal en ook in andere metalen worden gebracht komen in hoofdstuk 7 ter sprake.

6.1 **KOOLSTOF IN STAAL, HET IJZER-KOOLSTOFDIAGRAM**

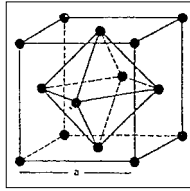
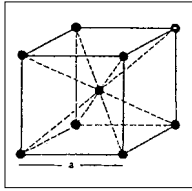


Figuur 6.1 Het ijzer- koolstof diagram

Het ijzer-koolstofdiagram, waarvan figuur 6.1 een afbeelding is, is een toestandsdiagram, dat de toestand van ijzer-koolstoflegeringen van diverse samenstellingen bij diverse temperaturen weergeeft.

Om praktische redenen geeft men het koolstofgehalte aan van 0 tot 5% en de temperaturen boven 500 °C (waarbeneden niets meer verandert) tot boven het smeltpunt. Het Fe-C-diagram is een evenwichtsdiagram, waarin de Fe-C-legeringen zijn weergegeven, nadat ze langzaam zijn afgekoeld en tot rust gekomen.

De instabiele martensietfase zal men daarin niet aantreffen, omdat deze niet in evenwichtstoestand verkeert.



Figuur 6.2 De twee kristalstructuren van ijzer. Links: een eenheids-cel van ruimtegecentreerd kubisch α -ijzer, rechts: vlakkegecentreerd γ -ijzer

6.1.1 FERRIET

Ferriet is ruimtegecentreerd kubisch gekristalliseerd ijzer, α -ijzer. Ook bij zeer hoge temperaturen komt een ruimtegecentreerde ijzervorm voor, die men meestal δ -ferriet noemt. Zie het ijzer-koolstofdiagram, figuur 6.1, rond 1500 °C. Ferriet kan afhankelijk van de temperatuur slechts 0,04 tot 0,07% koolstof in oplossing houden. Het is *ferromagnetisch*, dat wil zeggen het wordt door een magneet aangetrokken.

6.1.2 AUSTENIET

Austeniet is vlakkegecentreerd kubisch ijzer (zie voor beide structuren figuur 6.2), dat bij 1147 °C bijna 1,7% koolstof kan oplossen. Dit is γ -ijzer. Het is *niet ferro-magnetisch*. Beneden 721 °C komt het in koolstofstaal niet voor. Tabel 6.1 geeft de voornaamste verschillen aan tussen ferriet en austeniet.

6.1.3 CEMENTIET

Cementiet is ijzercarbide, Fe_3C , dat 6,67% koolstof bevat. Cementiet is zeer hard en komt op diverse plaatsen in het ijzer-koolstofdiagram voor.

TABEL 6.1 Voornaamste verschillen tussen ferriet en austeniet

FERRIET
 α -ijzer

komt voor beneden 906 °C
(er is ook δ -ferriet, dat bestaat boven 1400 °C; dit kan voorkomen in lasnaden, waarin het door snelle afkoeling is 'vastgevroren')

Ferromagnetisch (wordt door een magneet aangetrokken)

kan maar zeer weinig koolstof opgelost houden

AUSTENIET
 γ -ijzer

komt voor boven 721 °C

wordt niet door een magneet aangetrokken

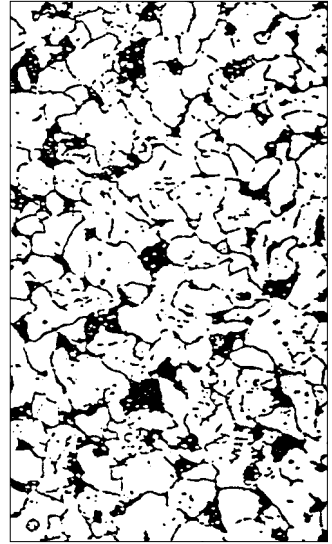
kan veel koolstof opgelost houden, tot 1,7% bij 1147 °C.



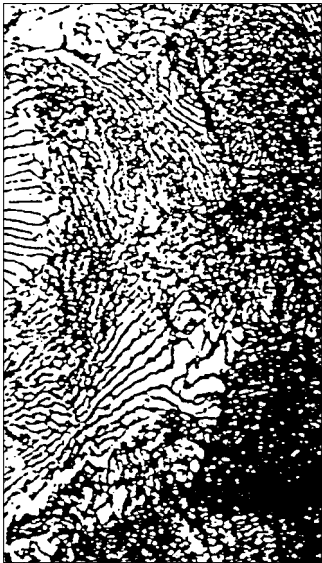
Figuur 6.3 Ferriet AISI 1001, 250 x



Figuur 6.4 Austeniet, AISI 304, (roestvast staal), 250 x



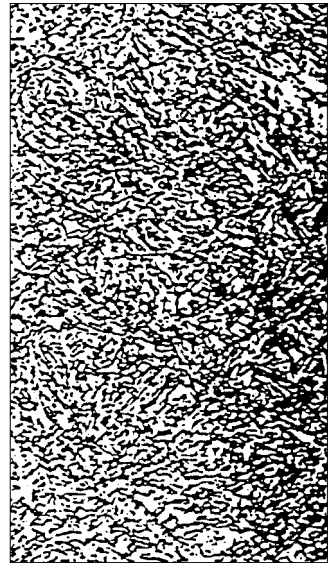
Figuur 6.5 Ferriet met weinig perliet AISI 1015, 0,4% c, 250 x



Figuur 6.6 Perliet, AISI 1070, 0,9% c, 600 x



Figuur 6.7 Grove martensiet, AISI 1060, 600 x



Figuur 6.8 Fijne martensiet, AISI 1060, 600 x



6.1.4 PERLIET

Perliet is een eutecticum, dat in de vaste toestand is ontstaan uit α -ijzer, dat is ferriet en cementiet. Het kristalliseert, zoals veel andere eutectica ook doen, in een fijne verdeling, meestal als lamellaire perliet (afwisselende blaadjes ferriet en cementiet) en soms ook als korrelperliet.

Zuivere perliet bevat 0,9% koolstof (eutectische samenstelling).

Bevat het staal minder koolstof, dan treft men ferriet en perliet aan. Bevat het meer koolstof, dan bestaat de structuur uit perliet plus cementiet.

De blaadjes in perliet zijn met een metaalmicroscop goed te onderscheiden. Zeer fijne (nauwelijks nog zichtbare) perliet noemt men ook wel sorbiet (wel goed te zien met een elektronenmicroscop) en nog fijnere perliet heet troostiet.

6.1.5 MARTENSIET

Martensiet is het instabiele omzettingsproduct dat uit austeniet ontstaat, wanneer de afkoelsnelheid zo groot is dat de opgeloste koolstof niet voldoende tijd heeft om perliet te vormen. Deze koolstof blijft in het kristalrooster gevangen, waarin door de γ - α -omzetting eigenlijk geen plaats meer is en het veroorzaakt grote inwendige spanningen, waarop de hardheid van gehard staal berust. De temperatuur, waarbij koolstof niet meer uit het kristalrooster kan treden, noemt men het martensietpunt. Dat ligt in koolstofstaal bij circa 250 °C.

6.2 HARDEN EN VEREDELLEN

Harden en verdelen dienen ervoor om de mechanische (=sterkte-)eigenschappen van staal te beïnvloeden.

De martensieharding van staal is een tamelijk unieke warmtebehandeling, die op ijzer-koolstoflegeringen kan worden uitgevoerd. Slechts bij enkele andere metalen en legeringen komt deze hardingsmogelijkheid ook voor.

Veel algemener zijn harden door koud bewerken (vervormen) en dispersieharding door uitscheiden van fijne bestanddelen. Naast de martensieharding worden ook deze mogelijkheden op staal toegepast.

6.2.1 MARTENSIETHARDEN

Onder martensiehardening van staal verstaat men het afschrikken (in water, olie of lucht) van staal dat door verhitting geheel in de austeniettoestand is gebracht.

De snelle afkoeling die daarbij optreedt onderdrukt het omzetten van austeniet in ferriet en cementiet.

De omzetting van de austenietkristalstructuur naar de ferrietkristalstructuur wordt niet onderdrukt, want daarvoor zijn maar zwakke atoombewegingen nodig.

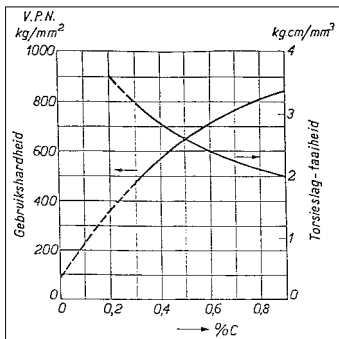
De overgang echter van koolstof die zich in het austenietrooster bevindt naar een verbinding van ijzer en koolstof, het cementiet, Fe_3C , vraagt zoveel tijd dat dit verschijnsel zich tijdens de snelle afkoeling van het afschrikken niet geheel kan voltrekken.

Ferriet is echter een kristalstructuur die maar zeer kleine hoeveelheden koolstof in vaste oplossing kan houden en die nu oververzadigd wordt met alle aanwezige koolstof.

Deze oververzadiging veroorzaakt grote inwendige spanningen, die zich kenbaar maken als hardheid.

Twee punten zijn belangrijk bij het martensietharden van staal:

- koolstof is een essentieel bestanddeel voor het hardingsproces
- hoe meer koolstof aanwezig is, des te groter zal de hardheid na het afschrikken zijn.

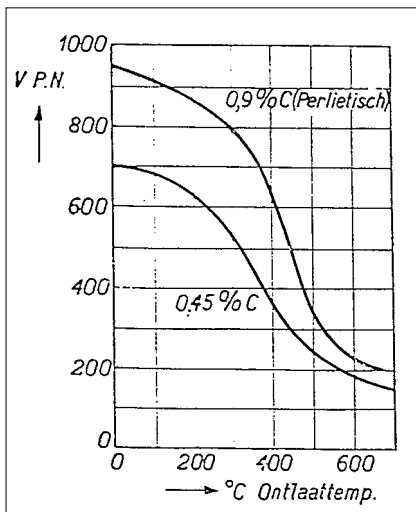


Er is dus een bepaalde afkoelsnelheid nodig om tot vorming van martensiet te komen. De afkoelsnelheid, waarbij nog juist martensiet ontstaat noemt men de kritische afkoelsnelheid van het staal.

Figuur 6.9 toont de hardheid van koolstofstaal in zachte en geharde toestand bij koolstofgehalten van 0-1,0%.

Figuur 6.9 Met toenemend koolstofgehalte wordt de bereikbare hardheid hoger, maar de taaiheid neemt af (volgens Palmer)

6.2.2 KRITISCHE AFKOELSNELHEID



Figuur 6.10 Koolstofstaal met verschillende koolstofgehalten na harden en ontlaten

De kritische afkoelsnelheid van koolstofstaal, dat dus naast koolstof geen andere legeringselementen bevat, is hoog, zodat men dus snel moet afschrikken. Bovendien is deze snelheid ook afhankelijk van het koolstofgehalte en hij is bij minder dan 0,3% koolstof zo groot, dat men in de praktijk geen redelijke harding meer kan verkrijgen. Toch kan men door het toepassen van bepaalde kunstgrepen, waarover later meer, reeds bij koolstofgehalten van 0,1 en 0,2% en een zeer grote afkoelsnelheid toch ook een merkbare harding verkrijgen.

Als men uitgaat van staal met 0,9% koolstof (dat in zachtgloeiende toestand voor 100% uit perliet bestaat) krijgt men een martensiettype van zeer grote hardheid, dat ook wel hardeniet wordt genoemd.

Bij nog hogere koolstofgehalten treedt naast perliet ook korrelvormige cementiet in de structuur op, waardoor bijvoorbeeld de goede snij-eigenschappen van scheermesjes kunnen worden verklaard. De sterkte van het staal neemt boven 0,9% koolstof niet verder toe.

.....

Martensiet wordt weliswaar harder met toenemend koolstofgehalte, maar de taaigheid neemt daarbij af, zoals figuur 6.10 laat zien.

6.2.3 INVLOED VAN LEGERINGSELEMENTEN

Door het toevoegen van legeringselementen aan koolstofstaal wordt de kritische afkoelsnelheid meestal verlaagd. Wat de betekenis hiervan is wordt duidelijk als men bedenkt welke invloed de warmte-afvoer, de 'afschriksnelheid', heeft op de doorhardingsdiepte van staal.

Verhit men een tamelijk dikke staaf of blok koolstofstaal tot hardingstemperatuur, en schrikt men deze daarna af in water, dan zal aan het oppervlak de warmte voldoende snel worden afgevoerd om de kritische afkoelsnelheid te overschrijden, waardoor martensietvorming optreedt.

In de kern van het materiaal echter treedt niet zo'n snelle afkoeling op, omdat de warmte door geleiding eerst naar de buitenzijde van het materiaal moet worden afgevoerd. Als gevolg daarvan wordt in de kern van het materiaal de kritische afkoelsnelheid niet overschreden, zodat daar dus de normale cementvorming optreedt, als regel in de vorm van perliet. De kern van het materiaal blijft dus zacht.

Koolstofstaal heeft dan ook slechts een geringe doorhardingsdiepte, die ligt in de orde van 6 mm.

Legeringselementen in staal kunnen vaak de kritische afkoelsnelheid vermindern, waardoor deze gelegerde staalsoorten veel dieper doorharden, zodat er vaak na het afschrikken in het geheel geen zachte kern meer aanwezig is.

De legeringselementen die daarvoor in aanmerking komen zijn chroom, nikkel, mangaan, vanadium, wolfram en molybdeen, zie verder onder 6.3 en vervolg.

Bij koolstofstaal is voor martensieharding een afkoelsnelheid van circa 1000 °C/s nodig. Dit is alleen mogelijk door afschrikken in water (of een zoutoplossing) en dan bereikt men nog maar een geringe doorhardingsdiepte.

Laaggelegerd staal hoeft voor martensietvorming vaak niet in water te worden afgeschrikt, maar dit kan in olie of zelfs in de lucht plaatsvinden. In olie kan een afkoelsnelheid van 120 °C/s worden verkregen.

Voor stalen voorwerpen met een dikte groter dan 8 à 10 mm, die tot in de kern gehard en eventueel veredeld moeten worden, is gelegerd staal nodig.

6.2.4 VEREDELLEN

Gehard koolstofstaal kan men voorzichtig veredelen met het doel het verlies aan taaigheid op te heffen: het staal wordt minder bros, zonder de sterkte (uit te drukken als hardheid, maar ook als treksterkte) teveel laten afnemen.

Met betrekking tot taaigheid en hardheid kan men twee toepassingsgebieden onderscheiden:

- afgeschrikt en ontlaten op een temperatuur van circa 200 °C. Het staal is nu nog steeds hard, maar met behoud van die hardheid is tevens de taaigheid verbeterd

.....

- afgeschrikt en ontlaten op temperaturen boven 500 °C. Hierbij wordt de hardheid en de treksterkte prijsgegeven, maar het staal heeft nu zijn grootste taaiheid verkregen. Deze taaiheid is groter dan van hetzelfde staal in zachtgegloeide toestand.

Uiteraard zijn voor speciale doeleinden ook ontlaattemperaturen tussen 200 en 500 °C mogelijk.

Ook hier heeft het koolstofgehalte weer invloed op de te bereiken hardheid en de taaiheid.

Tabel 6.2 geeft gloei- en ontlaattemperaturen.

TABEL 6.2 Gloei en ontlaattemperaturen

Gloeien	°C	Ontlaten	°C
donkerbruin	550	witgeel	200
bruinrood	630	strogeel	220
donkerkersrood	740	goudgeel	230
rood	780	geelbruin	240
lichtkersrood	810	bruinrood	250
lichtrood	850	rood	260
oranjerood	900	purperrood	270
geelrood	950	violet	280
lichtgeelrood	1000	donkerblauw	290
geel	1100	korenbloemblauw	300
lichtgeel	1200	lichtblauw	320
geelwit	1300	middelblauw	340
		grijs	360

6.2.5 ONTLAATBROSHEID

In het ontlaatgebied tussen 200 en 500 °C vertonen diverse staalsoorten het verschijnsel van ontlaatbrosheid, dat vooral rond 300 °C optreedt.

Die temperatuur moet men toepassen als men staal tot een hoge sterkte wil veredelen.

Door het toevoegen van metalen die het ontlaten vertragen is het mogelijk bij een hoge temperatuur te veredelen, waardoor men buiten het gebied van de ontlaatbrosheid komt. Legeringsbestanddelen, die daarvoor in aanmerking komen, zijn vooral molybdeen en wolfram.

6.3 DE INVLOED VAN LEGERINGSELEMENTEN OP HET HARDINGS- EN VERDELINGSGEDRAG VAN STAAL

Over koolstof als legeringselement in staal is in het voorgaande voldoende gezegd.



6.3.1 SILICIUM

Silicium dient bij de staalbereiding als desoxidatiemiddel, het kalmeert het staal in vloeibare toestand, maakt het rustig. Silicium vergroot de treksterkte, de rekgrens, de elasticiteitsgrens, de hardheid, de warmvastheid, de slijtvastheid, de corrosieweerstand en de oxidatievastheid. Silicium vermindert de kerfslagwaarde, de dieptrekeigenschappen, de verspaanbaarheid, de smeed- en lasbaarheid, de dichtheid en het geleidingsvermogen voor warmte en elektriciteit. Het wordt in constructiestaal gebruikt in gehalten van 1,0-1,4% en in staal voor vrachtauto's tot 2,0%.

6.3.2 MANGAAN

Mangaan dient voor het ontzwavelen van vloeibaar staal. Het vergroot het gammagebied, zodat staal met meer dan 12% Mn bij omgevingstemperatuur austenitisch is. Mangaan vermindert de kritische afkoelsnelheid van staal, zodat bij meer dan 3% Mn reeds bij afkoelen aan de lucht een veredelde structuur optreedt. Mangaan verhoogt de treksterkte, de rekgrens, de elasticiteitsgrens, de warmvastheid, de smeedbaarheid, de slijtvastheid, de doorhardingsdiepte, de ontlaatbestendigheid, de ontlaatbrosheid, de vorming van grove korrels en de vorming van carbiden. Mangaan vermindert de dieptrekeigenschappen, de verspaanbaarheid en het geleidingsvermogen voor warmte en elektriciteit.

6.3.3. NIKKEL

Nikkel vergroot het gamma-gebied, zodat staalsoorten met een hoog nikkelgehalte volledig austenitisch zijn. Nikkel vertraagt de kritische afkoelsnelheid van staal. Nikkel verhoogt de treksterkte, de rekgrens, de elasticiteitsgrens, de rek, de warmvastheid, de doorharding, de dichtheid, de corrosievastheid, de weerstand tegen oxidatie en de weerstand tegen roodbreuk. Nikkel verlaagt de dieptrekeigenschappen, de verspaanbaarheid en het geleidingsvermogen voor warmte en elektriciteit. In veredelingsstaal wordt nikkel in gehalten van 1-5% gebruikt en het maakt een belangrijk bestanddeel uit van austenitische roestvaste staalsoorten.

6.3.4 KOBALT

Kobalt vergroot het gamma-gebied van ijzer. Kobalt vergroot de treksterkte, de rekgrens, de warmvastheid, de hardheid, de neiging tot roodbreuk, de slijtvastheid en het geleidingsvermogen voor warmte en elektriciteit. Het heeft een gunstige invloed op de weerstand tegen corrosie en oxidatie. Kobalt verlaagt de rek, de doorhardingsdiepte en de warmtegevoeligheid.

.....

Het wordt in constructiestaal weinig gebruikt, maar veel in gereedschapstalen in gehalten tot 4 en 5% en in sneldraaistalen tot 20%.
Kobalt vergroot als enig element duidelijk het geleidingsvermogen voor warmte en elektriciteit.

6.3.5 ALUMINIUM

Aluminium wordt gebruikt voor de desoxidatie en korrelverfijning van staal, het verkleint het gamma-gebied.
Aluminium vergroot de warmvastheid, de oxidatieweerstand en de weerstand tegen corrosie.

Het verlaagt de mechanische eigenschappen, de doorhardingsdiepte, de verspaanbaarheid en het geleidingsvermogen voor warmte en elektriciteit.

Tot nu toe is gesproken over elementen die geen carbidevorming vertonen. De carbidevormende elementen die belangrijk zijn in gereedschapstaal zijn chroom, molybdeen, wolfram, vanadium, tantaal, titaan en niobium.

6.3.6 CHROOM

Chroom is een zeer sterke carbidevormer die het gamma-gebied verkleint. In corrosievaste staalsoorten moet het koolstofgehalte laag gehouden worden om de vorming van chroomcarbiden te voorkomen.

Chroom vermindert in belangrijke mate de kritische afkoelsnelheid, zodat staal met meer dan 12% chroom reeds door afkoeling aan de lucht hardt.

Chroom vergroot de mechanische eigenschappen, de taaigheid, de warmtebestendigheid en de weerstand tegen corrosie en oxidatie.

Chroom verlaagt de kerfslagwaarde, de dieptrekeigenschappen, de neiging tot roodbreuk en het elektrisch geleidingsvermogen.

6.3.7 MOLYBDEEN

Molybdeen verkleint het gamma-gebied. Molybdeen is een zeer sterke carbidevormer. Molybdeen verhoogt de mechanische eigenschappen, de kerfslagtaaiheid, de doorhardingsdiepte, de slijtvastheid en de weerstand tegen corrosie en oxidatie. Het vermindert ook het gevaar van roodbreuk.

Molybdeen verlaagt de ontlaatbrosheid, de smeed- en persbaarheid.

In gereedschapstalen wordt molybdeen tot 1% gebruikt, waarbij het gevaar voor ontlaatbrosheid verdwijnt.

6.3.8 WOLFRAAM

Wolfraam is een element dat het gamma-gebied zeer sterk verkleint.

Bovendien is het een sterke carbidevormer, nog sterker dan chroom.

Door toevoeging van alleen wolfram wordt de kritische afkoelsnelheid maar

.....

weinig vertraagd, maar als er ook chroom aanwezig is verkrijgt men een diepe doorharding.

Wolfram verbetert de mechanische eigenschappen.

Wolfram verkleint de rek en de ontlaatbestendigheid.

6.3.9. VANADIUM

Vanadium engt het gamma-gebied zeer sterk in; het is ook een zeer sterke carbidevormer. Het vermindert in sterke mate de kritische afkoelsnelheid van staal. De belangrijkste functies van vanadium in staal zijn korrelverfijning en vergroting van de taaiheid. Het wordt vrijwel uitsluitend in gereedschapstalen gebruikt.

6.3.10 TANTAAL, TITAAN EN NIOBIUM

De genoemde elementen verkleinen het gamma-gebied in sterke mate, ze hebben een grote affiniteit voor koolstof en het zijn dus uitgesproken carbidevormers. Ze vergroten in sterke mate de mechanische eigenschappen en in corrosievaste stalen kunnen ze de schadelijke invloed van koolstof verminderen doordat ze een grotere affiniteit voor koolstof hebben dan chroom.

6.4 OPPERVLAKTEHARDEN

Met oppervlakteharden maakt men gebruik van een eigenschap die in het voorgaande als nadelig werd beschouwd: de geringe doorhardingsdiepte van staal, waardoor de kern niet gehard wordt.

In bepaalde gevallen kan men hiervan in gunstige zin gebruik maken, doordat men een hard oppervlak combineert met een taai kern, waardoor het gevaar voor breuk vermindert. Een toepassingsvoorbeeld vindt men bij tandwielen.

Er zijn twee manieren om dit te bereiken:

- door een behandeling waarbij de samenstelling van het staal niet verandert
- door een behandeling waarbij de samenstelling van het staal wordt veranderd door de toevoeging van niet-metalen.

De tweede methode wordt, indien metalen aan het oppervlak worden toegevoegd, in hoofdstuk 7 behandeld.

Bij oppervlakteharden, waarbij de samenstelling van het staal niet verandert, onderscheidt men:

- vlamharden
- laag-, middel- en hoogfrequent harden
- laserharden
- elektronenstraalharden.

.....

6.4.1 VLAMHARDEN

Vlamharden, ook nog wel aangeduid met de naam shorteren, wordt uitgevoerd door het oppervlak van het staal tot even boven de hardingstemperatuur te verhitten met één of meer zeer hete zuurstof-acetyleen of zuurstof-propaan-vlammen en direct daarna met water af te schrikken.

Bij zwaardere werkstukken wordt daarbij de kern niet warm.

Als regel zijn de branders en de waterdouche op één gestel gemonteerd, dat zich langs het metaaloppervlak beweegt (progressief harden).

Het proces wordt ondermeer toegepast voor het harden van grote tandwielen, maar het wordt meer en meer verdrongen door hoogfrequent harden.

6.4.2 INDUCTIEHARDEN

Met behulp van laag-, middel- en hoogfrequente elektrische velden kan men door inductie in korte tijd zoveel energie in een staaloppervlak brengen, dat dit tot de hardingstemperatuur wordt verhit.

TABEL 6.3 Maximaal mogelijke warmte-overdracht op metaal

Convectie	0,1-0,5 W/cm ²
Straling	1-25 W/cm ² (laser veel hoger)
Contact	20 W/cm ²
Vlam	1000 W/cm ²
Inductie	20000 W/cm ²

Het oppervlak van een stalen werkstuk is bij een vermogen van

1 kW/cm² in 2 s op 1000 °C

20 kW/cm² in 0,005 s op 1000 °C.

Hoe hoger de frequentie, hoe geringer de indringdiepte.

Er bestaat een neiging voor bepaalde gevallen een veel hogere frequentie toe te passen van 3 MHz en zelfs 20 MHz.

Daarvoor is een kostbare hoogfrequentgenerator nodig.

Bij deze hoge frequentie kan een dunne oppervlaktelaag zo snel worden verhit, zodat deze door het nog koude onderliggende metaal wordt afgeschrikt zonder dat hiervoor uitwendige koeling nodig is.

Daar bovendien het afgegeven vermogen kan worden ingesteld heeft men bij inductieharden een grote vrijheid in hardingsdiepte en opwarmtijd. Daardoor kunnen ook betrekkelijk kleine voorwerpen (delen van apparaten en instrumenten en zelfs astapjes van horloges) nog op deze wijze worden gehard, terwijl de kern taai blijft.

Door de zeer snelle opwarm- en afkoelcyclus kunnen ook staalsoorten die als niet hardbaar worden beschouwd, bijvoorbeeld met slechts 0,2% koolstof, nog worden gehard.

Bij deze lage koolstofgehalten is de kritische afkoelsnelheid van het staal zó groot dat deze bij andere hardingsprocessen niet kan worden overschreden.

Dit gelukt slechts bij hoogfrequent harden.

.....

Inductieharden wordt daarom steeds meer toegepast en verdringt het vlamharden geleidelijk, hoewel de noodzakelijke apparatuur belangrijk duurder is. Toepassingen vindt men bij tandwielen, krukassen, nokkassen, instrumentonderdelen en tal van andere machinedelen die een hard oppervlak en een taai kern moeten hebben.

Het proces is vooral geschikt voor massaproductie, omdat de voor het harden noodzakelijke inductiespoelen als regel voor elk voorwerp apart moet worden vervaardigd.

Ten gevolge van zeer korte verhittingsduur treedt weinig oxidevorming op.

6.4.3 INVLOED VAN FREQUENTIE EN VERMOGENSDICHTHEID

Hoewel de hardingsdiepte bij inductief oppervlakteharden in eerste instantie afhankelijk is van de frequentie, omdat immers door de frequentie de indringdiepte van de geïnduceerde hoogfrequente stroom wordt bepaald, is deze mede afhankelijk van het specifiek vermogen in het werkstuk. Naarmate dit specifieke vermogen hoger is wordt de hardingstemperatuur sneller bereikt en zal in die tussentijd minder warmte gelegenheid hebben naar binnen door te vloeien.

De grootste vermogensdichtheid, die momenteel kan worden bereikt, en die ondermeer afhankelijk is van de koppeling tussen de werkspoel en het werkstuk en de koeling van de spoel, ligt in de buurt van 4 à 5 kW/cm².

Bij deze vermogensdichtheden kan men zelfs bij gebruikmaking van middelfrequente stromen nog een geringere doorhardingsdiepte verkrijgen, die bijvoorbeeld bij 4 kHz 1,4 mm bedraagt en bij 8 kHz 1,2 mm.

Toch wordt harden bij middelfrequenties minder toegepast dan bij hogere frequenties. De meeste van deze hardingsinstallaties werken bij frequenties tussen 300 en 1500 kHz.

Tabel 6.4 toont de hardingsdiepte van staal, afhankelijk van het specifieke vermogen.

TABEL 6.4 Hardingsdiepte van staal in afhankelijkheid van het specifieke vermogen bij 400 kHz

<u>Hardingsdiepte</u> in mm	<u>Opwarmtijd</u> in s	<u>Specifiek vermogen</u> in kW/cm ²
0,50	0,15	5,6
0,75	0,40	3,6
1,0	0,70	2,5
1,3	1,3	2,0
2,0	3,0	1,4
2,5	4,5	0,9

Er bestaat de neiging voor bepaalde gevallen gebruik te maken van belangrijk hogere frequenties, tot zelfs 20 MHz. Bij deze hoge frequenties kan een dunne oppervlaktelaag zo snel worden verhit, dat deze ten gevolge van de lage temperatuur van het onderliggende metaal wordt afgeschrikt, zonder dat hiervoor water of een ander koelmiddel nodig is.

Inductief, hoogfrequent harden worden toegepast op gereedschappen zoals

.....

spiraalboren. Ook het harden van een lintzaag, waarbij alleen de tanden worden gehard en de zaagband taai blijft is een karakteristiek voorbeeld. Voor het harden van tandwielen kan men een spoel om het gehele tandwiel leggen, zodat alle tanden tegelijk worden gehard, of men kan voor grotere modulus tand voor tand harden. In het laatste geval moet men ook de tussenruimte tussen de tanden in het hardingsproces meenemen, omdat anders gevaar voor tandbreuk bestaat op de grens van het geharde en niet-geharde gebied.

Bij het harden van tandwielen werkt men met energiedichtheden tussen 1 en 2 kW/cm².

Hoe kleiner de modulus van het tandwiel, des te sneller moet de verwarming plaatsvinden, zodat de vermogensdichtheid dan ook groter moet zijn.

Bij het harden van walsrollen wordt als regel progressief harden toegepast, waarbij de werkspoel en een watersproeier zich gelijkmatig over het werkstuk bewegen.

De ervaring heeft geleerd dat een 40 kW middelfrequente energie ruimschoots voldoende is voor het harden van een walsrol met een diameter van ongeveer 50 cm. Vaak wordt gebruik gemaakt van een draaiende omvormer die een frequentie levert van 1 kHz.

Tal van andere voorbeelden zijn te noemen van het hoogfrequent oppervlakteharden, zoals krukassen, lange werkstukken en diverse auto-onderdelen.

6.4.4 LASERHARDEN EN ELEKTRONENSTRAALHARDEN

Met laserstraling (in de atmosfeer) of in een schutgas kan men in korte tijd zeer veel energie overbrengen. Die energie kan zo groot zijn dat het materiaal smelt en zelfs verdampt.

Laserstraling wordt als regel puntvormig opgebracht en als men een oppervlak wil harden moet men de laserstraling over het werkstuk laten oscilleren.

Omdat laserstraling lichtstraling is kan men dat niet elektronisch doen, maar men moet met behulp van een spiegel, die snel wordt bewogen, dit oscillerende gedrag realiseren.

Bij elektronenstraalharding heeft men (evenals in een televisiebeeldbuis) de mogelijkheid om de puntvormige elektronenbundel over het werkstukoppervlak te laten bewegen. Hier is dus (eventueel hoogfrequente) oscillatie mogelijk. Men gebruikt deze techniek momenteel voor het harden van walsrollen die gebruikt worden voor het walsen van staal en aluminium.

Elektronenstraling verplaatst zich slechts op korte afstand door de lucht, zodat voor elektronenstraalharden een trechtervormige vacuümbuis moet worden gebruikt, die aan de onderzijde is afgedekt met een venster van beryllium. Dit venster laat de elektronenstraling voldoende door. Toch kan de afstand tot het werkstuk maar enige centimeters bedragen.

Met deze techniek is inmiddels voldoende ervaring opgedaan, omdat deze ook op andere terreinen, bijvoorbeeld het uitharden van verf, wordt toegepast.

6.5

WARMTEBEHANDELINGEN, WAARBIJ DE SAMENSTELLING VAN HET OPPERVLAK VERANDERT

Thermische behandelingen, waarbij de samenstelling van het oppervlak verandert, zijn diffusiebehandelingen.

Ook niet-metalen kunnen door diffusieprocessen in een metaaloppervlak worden gebracht, evenals combinaties van niet-metalen of van een metaal en een niet-metaal.

Warmtebehandelingen, waarbij de samenstelling van het metaaloppervlak verandert, worden meestal uitgevoerd op staal. Tot deze behandelingen behoort het ontkolen, maar meestal brengt men bij deze processen bepaalde elementen in de oppervlaktelaag. Het zijn alle diffusieprocessen die enige tijd vergen. De voornaamste zijn:

- carboneren
- ontkolen
- nitreren
- zacht nitreren
- carboniteren
- sulfineren
- siliceren
- boreren.

Tabel 6.5 geeft een overzicht van een aantal elementen, niet-metalen, die door diffusieprocessen kunnen worden ingebracht.

TABEL 6.5 Door diffusieprocessen in metaaloppervlakken ingebrachte niet-metalen

<u>Element</u>	<u>Naam proces</u>	<u>Ingebracht in</u>
C	carboneren	Fe, Ti en veel legeringen
N	nitreren	Fe, Al, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Nb, Si, Ti, Y, Zr
C + N	zacht nitreren carbonitreren	Fe en een aantal legeringen
Si	siliceren	Fe, Al, Be, Cu, Mo, Nb, Ni, Ta, Ti, V, W
S	sulfineren	Fe, Mo, W, Co
Se	seleneren	Fe, Cu, Mo
Te	tellureren	Fe, Cu, Mo
B	boreren	Fe, Al, Co, Cr, Mo, Nb en veel legeringen
P	fosforeren *)	Fe
J	joderen	Fe

*) niet te verwisselen met fosfateren.

Daarbij treft men enige overlappingsen aan. Elementen als borium en silicium kunnen zich als metaal en ook als niet-metaal gedragen. Naast het inbrengen van elementen in het metaaloppervlak kunnen diffusieprocessen ook omge-

.....

keerd werken: het uitdrijven van ongewenste bestanddelen.

Het bekendst en het meest toegepast is het uitdrijven van waterstof die, indien opgenomen in gehard of veredeld staal en enige andere metalen, gevaar voor breuk door waterstofbroosheid oplevert.

Een ander proces dat op grote schaal wordt uitgevoerd is het ontkolen van staal, zie 6.5.5, ondermeer voor rotor- en statorplaat en voor emailleerstaal dat dient voor het éénlaagproces.

De thermische bewerkingen voor het inbrengen van niet-metalen kunnen zich afspelen in de vaste fase, de vloeibare fase en de gasfase.

6.5.1 CARBONEREN

Carboneren is het inbrengen van koolstof (Latijn: carbonium, symbool: C) in een staaloppervlak. Het proces is ook bekend onder de namen cementeren, carbureren en inzetten.

Het doel van carboneren is van een staal met een laag koolstofgehalte een oppervlaktelaag met een dikte van $\frac{1}{2}$ à 1 mm zodanig op te kolen, dat deze kan worden gehard.

Aansluitend aan het carboneren zal men als regel een hardingsbewerking uitvoeren. Indien mogelijk worden de werkstukken die nog heet zijn van het carboneren direct afgeschrikt. Wanneer dit niet mogelijk is worden de voorwerpen opnieuw verhit tot hardingstemperatuur. De toepassingen van carboneren zijn dezelfde als bij oppervlakteharden, dat in 6.4 is besproken.

Men gaat uit van een werkstuk met een koolstofgehalte van 0,2% of minder. Dit bezit na harden een hardheid van slechts 300 Vickers.

Wanneer men dit werkstuk bij 900-1000 °C verhit in een koolstofhoudende omgeving, die reageert met het staaloppervlak, wordt koolstof opgenomen en naar binnen getransporteerd door diffusie. Daardoor wordt aan het oppervlak ruimte gemaakt voor nieuwe koolstofopname.

Het proces wordt onderbroken als de laagdikte van de opgekoolde zone een dikte van enige tienden tot 1 mm heeft gekregen, echter nooit dikker dan 10% van de totale doorsnede.

De structuur van het staal bestaat bij 900 °C uit austeniet, dat in de kern 0,2% koolstof en aan de rand 0,9% koolstof bevat.

De carboneertemperatuur van 900 °C heeft twee redenen:

- hoe hoger de temperatuur, hoe sneller het koolstoftransport door het staal plaatsvindt
- austeniet kan bij deze temperatuur 1,2% koolstof in oplossing houden.

Het koolstofgehalte in de randzone kan oplopen tot boven 1,2%. Bij deze 'overkoling' ontstaat in de gevormde martensiet een cementietnetwerk, dat de mechanische eigenschappen benadeelt; bij slijpen kan de geharde laag scheuren en loskomen. Men moet daarom streven naar een koolstofgehalte in de randzone van 0,8-0,9%. Door het kiezen van geschikte werkomstandigheden: temperatuur en tijd - mede afhankelijk van de staalsamenstelling en het opkollingsmiddel - is dit realiseerbaar.

.....

Gebruikelijke carboneermethoden zijn:

- carboneren in kisten
- zoutbad carboneren
- gascarboneren
- laserondersteund carboneren.

6.5.2. CARBONEREN IN KISTEN

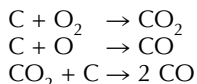
Carboneren in 'cementeerpoeder', kistcarboneren, (Engels: pack carburizing) wordt uitgevoerd in een poeder, dat bestaat uit koolstof of koolstofafgevende, deels organische bestanddelen.

De werkstukken worden in kisten gepakt, die met poeder gevuld zijn. Daarna worden de kisten geheel gesloten en met vuurklei afgesmeerd.

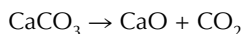
Ze worden vervolgens verhit in een oven (vroeger ook in een kolenvuur).

Met het openen van de kisten gaat tijd verloren, zodat men voor het harden opnieuw moet verwarmen.

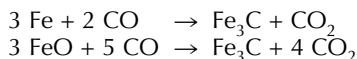
Gebruikt men als carboneermiddel koolpoeder, zoals houtskool, dan kan de reactie alleen verlopen als aanwezige luchtzuurstof de reactie inleidt:



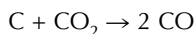
Vaak wordt koolpoeder vermengd met 'activatoren', zoals barium-, natrium-, kalium-, calcium-, magnesium- of strontiumcarbonaat, die bij hoge temperatuur kooldioxide afgeven volgens:



Kooldioxide kan direct met de aanwezige koolstof reageren onder vorming van koolmonoxide, CO. Het opkolingsproces vindt plaats in het temperatuurgebied tussen 500-950 °C:



Met deze behandeling kunnen na een urenlange gloeitijd carboneerdiepten tot 3 mm worden verkregen. Bij 900 °C wordt in één uur een carboneerdiepte van 0,5 mm bereikt. Wanneer een opgekoold oppervlak bij hoge temperatuur met kooldioxide in aanraking komt treedt ontkoling op onder CO-vorming:



Dit moet uiteraard worden vermeden.

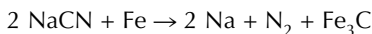
Dit doet men door het CO-aanbod groot te doen zijn ten opzichte van de CO₂-concentratie. Bij hogere temperaturen, waarbij snellere koolstofopname en -diffusie optreden, moet de CO-concentratie nog groter zijn om ontkoling te voorkomen.

.....

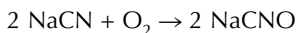
Werkstukken, die na het afkoelen en openen van de kisten gehard moeten worden, moet men eerst zachtgloeien bij circa 650 °C tot een hardheid lager dan 32 Rockwell-C. De in het algemeen lange verhittingsduur bij kistcarboneren (enige uren) leidt tot een grofkorrelige structuur van de kern. Dit kan men grotendeels tegengaan door normaliserend gloeien vóór de carboneerbehandeling, waardoor ook inwendige spanningen worden opgeheven en vervormingen worden voorkomen.

6.5.3 ZOUTBADCARBONEREN

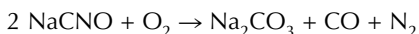
Carboneren in een zoutsmelt (Engels: liquid carburizing) wordt in een zoutmengsel uitgevoerd bij een zodanige temperatuur dat uitsluitend koolstof wordt afgegeven. Nadat een laag van voldoende dikte is opgebouwd kunnen de voorwerpen direct worden afgeschrikt, waarbij de oppervlaktelaag wordt gehard. De chemische reacties, die bij zoutbadcarboneren optreden zijn gecompliceerd, zodat wij daarvan slechts een vereenvoudigde voorstelling geven. Het zoutbad bestaat meestal uit een smelt van natriumcyanide, NaCN. In vacuüm reageert dit vanaf 600 °C met ijzer volgens:



Bij luchttoetreding echter, die bij gesmolten zoutbaden altijd optreedt, oxideert cyanide tot cyanaat:



Bij hoge temperaturen oxideert het NaCNO volgens:



Het gevormde koolmonoxide leidt, zoals beschreven onder 6.5.2, tot opkoling. Ook hierbij kunnen activatoren, zoals BaCO₃, worden gebruikt.

De carboneertijd wordt gekozen naar de gewenste opkolingsdiepte. Bij een gecarboneerde laag tot 0,4 mm dik gebruikt men bij voorkeur een niet-geactiveerd bad. Hierbij treedt gemakkelijk overkoling op. De op deze manier behandelde werkstukken worden niet nageslepen (omdat daarbij teveel van de geharde zone verloren zou gaan).

Voor grotere inzetdiepten kiest men geactiveerde baden die bij 8 uur op 930 °C een carboneerdiepte tot 2 mm geven. Moeten deze werkstukken worden nabewerkt dan moet men ze eerst zacht gloeien:

- koolstofstaal 550-600 °C kort
- gelegeerd staal 650-850 °C gedurende enige uren.

Carboneren in kisten en zoutbadcarboneren worden nagenoeg niet meer gebruikt.



6.5.4 GASCARBONEREN

Carboneren in een gasstroom (Engels: gas carburizing) is een veelzijdige, goed te sturen techniek. Daarvoor is veel kennis van het carboneerproces noodzakelijk. Er zijn diverse carboneergassen mogelijk, die in geconcentreerde vorm of verdund met niet-werkzame gassen worden gebruikt. De temperatuur, waarbij gecarboneerd wordt is eveneens van belang, omdat deze de snelheid van de koolstofopname bepaalt en ook of ongewenste verschijnselen optreden, zoals de vorming van vrij cementiet, dat de laag bros maakt.

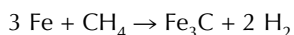
Door de samenstelling van het gas en de te gebruiken temperatuur is dit moderne proces zeer flexibel.

Eerzijds mag men een bepaalde temperatuur niet overschrijden (900-920 °C is gebruikelijk), maar er is ook een snelle carboneermethode, waarbij men werkt met temperaturen die wel 200 °C hoger zijn. De diffusiesnelheid van de koolstof in het staal is dan zo groot, dat aan het oppervlak geen te hoog koolstofgehalte optreedt. Deze methode wordt ondermeer toegepast voor het harden van tandwielen in autotransmissiesystemen.

De gassen, die voor gascarboneren worden gebruikt, zijn koolmonoxide, dat werkt zoals beschreven onder 6.5.2, formeergas dat gemaakt wordt uit gedeeltelijke verbranding van lichtgas (=steenkoolgas), aardgas en zelfs turfgas.

Koolwaterstoffen, zoals methaan, CH₄, propaan C₃H₈ en butaan C₄H₁₀ kunnen eveneens dienst doen.

Met methaan verloopt de volgende reactie:



De belangrijkste voordelen van carboneren in een gasstroom zijn:

- de opkolingstemperatuur kan binnen ruime grenzen worden gekozen, waardoor de snelheid van de koolstofopname en de diffusiesnelheid naar wens kunnen worden ingesteld
- de concentratie van het opkolende gas kan (door verdunning) aan het te carboneren oppervlak worden aangepast
- de opkolende werking van het gas kan tijdens het proces veranderd worden, bijvoorbeeld om een te hoog opgekoold oppervlak door diffusie weer op de juiste waarde te brengen.

In de meeste gevallen wordt na carboneren direct afgeschrikt om te harden (blank erin; blank eruit).

6.5.5 ONTKOLEN

Ontkolen van staal kan worden uitgevoerd bij hoge temperatuur in een oxidierende atmosfeer, waarbij een oxidelaag ontstaat. Veel vaker echter wordt ontkoold op hoge temperatuur in waterstofatmosfeer. Dit ontkolen wordt op tamelijk grote schaal toegepast voor het vervaardigen van emailleerkwaliteit staalplaat. Wanneer het ontkolen in een zeer zuivere waterstofatmosfeer wordt uitgevoerd blijft het metaal blank. Dit weinig toegepaste proces dient ook voor het beïnvloeden van de magnetische eigenschappen van staal.

.....

6.6 NITREREN

Bij nitreren brengt men door een geschikte warmtebehandeling stikstof (Latijn: nitrogenium, symbool N) in het staaloppervlak met het doel dit harder en slijtvaster te maken, zonder dat behoeft te worden nagehard. Nitreren kan op een aantal manieren worden uitgevoerd:

- gasnitreren
- nitreren in een zoutbad
- ionitreren
- ionenimplantatie.

Er treden vrijwel geen vormveranderingen op en ook bij fijnbewerkte werkstukken kan nitreren een eindbehandeling zijn. Zowel gewoon staal als gelegerd staal en roestvast staal kunnen worden genitreerd.

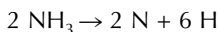
Nitreren kan ook laserondersteund worden uitgevoerd.

De beste resultaten verkrijgt men met speciale nitreerstalen die onder meer aluminium bevatten. Nitreren geeft ook een zekere corrosiewering. De toepassing van nitreren vindt men bij apparaten- en instrumentonderdelen, pluimers van brandstofpompen voor dieselmotoren en dergelijke.

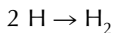
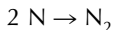
6.6.1 GASNITREREN

Gasnitreren (Engels: gas nitriding) wordt uitgevoerd in een atmosfeer van ontledend ammoniakgas. Bij het ontleden van ammoniak door verhitting op een temperatuur boven 500 °C wordt stikstof in atomaire vorm vrijgemaakt. Dit kan met ijzer reageren.

De dissociatie(=ontledings)reactie van ammoniak:



wordt direct gevolgd door reacties, waarbij de aanvankelijk gevormde atomaire stikstof en waterstof in moleculaire vorm overgaan:



Alleen atomaire stikstof reageert met staal.

In een gesloten ruimte met ammoniakgas is bij 400 °C de dissociatie reeds volledig, zodat bij het gasnitreren een voortdurende gasstroom in stand moet worden gehouden om het proces voortgang te doen vinden. Meestal vindt het nitreren plaats tussen 500 en 550 °C.

De α -fase met een kubisch ruimtegecentreerd kristalrooster (is ferriet) kan bij 590 °C 0,45% stikstof opnemen, maar bij kamertemperatuur slechts 0,001%.

De kubisch vlakkegecentreerde γ -fase kan tussen de ijzeratomen stikstof opnemen en wel 2,75% bij 590 °C. Bij langzaam afkoelen ontstaat een donker

.....

bestanddeel 'brauniet'. Bij lagere temperatuur vormt het een eutecticum. De η -fase is hexagonaal (=zeszijdig) gekristalliseerd. Deze fase bevat 8,1-11,2% stikstof. Bij 11,2% stikstof komt de samenstelling overeen met de formule Fe_2N .

Daarnaast komen ijzernitridenaalden voor, Fe_4N .

Het gasnitreren wordt meestal uitgevoerd tussen 500 en 550 °C, waarbij de snelheid van de gasstroom zo wordt ingesteld dat de dissociatiegraad tussen 18 en 25% bedraagt (Duitsland). In de USA werkt men bij 30-40% dissociatie. Het ammoniakgas wordt uit een drukfles met een reduceerventiel onder een druk van 60-80 mm waterkolom (600-800 Pa) toegevoegd.

Nitreren verloopt door de lagere temperatuur langzamer dan carboneren. De kortste behandelingsduur is 30 minuten; de langste wel 100 uur.

Niet alle staal is geschikt om te nitreren. Een noodzakelijk bestanddeel van nitreerstaal is aluminium naast chroom, die beide in gehalten van circa 1,2% worden gebruikt.

Na het nitreren is het oppervlak direct zeer hard en slijtvast, zonder dat daarvoor behoeft te worden afgeschrikt. Hardheden van 800-1200 Vickers (68-72 Rockwell-C) worden bereikt. De hardheid blijft ook tot redelijk hoge temperaturen, circa 500 °C, bestaan.

Slijpen wordt na nitreren niet uitgevoerd. De maatveranderingen zijn gering, maar men mag ze niet verwaarlozen (50 μm bij een nitreerdiepte van 750 μm). Eventueel moeten deze door het behandelen van proefstukken worden vastgesteld en daarmee moet dan bij de fabricage van de voorwerpen, vaak precisie-onderdelen, rekening worden gehouden.

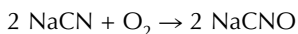
6.6.2 ZOUTBADNITREREN

Zoutbadnitreren vindt plaats in een gesmolten mengsel van natriumcyanide en kaliumcyanide, dat in een 60-40 verhouding smelt bij 502 °C. Vaak worden ook nog andere zouten toegevoegd.

Voor carboneren in een zoutbad wordt ook een cyanidesmelt gebruikt, echter bij circa 900 °C, dat is in het austenietgebied, waardoor snel veel koolstof kan worden opgenomen en naar dieper gelegen delen kan worden gediffundeerd. Nitreren daarentegen vindt plaats bij 520-560 °C, dus beneden het austenietgebied, zodat nauwelijks koolstof wordt opgenomen.

De twee processen onderscheiden zich bovendien daardoor dat nitreren veel langzamer verloopt dan carboneren.

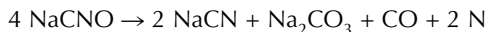
De chemische processen, die zich bij het zoutbadnitreren afspelen zijn vereenvoudigd weergegeven:



Het gevormde cyanaat kan verder oxideren tot



.....
maar het kan ook thermisch uiteenvallen:



De gevormde atomaire stikstof reageert met het staaloppervlak, waarin zich naast ijzernitride, Fe_3N , ook stikstofverbindingen van aluminium, chroom, molybdeen en vanadium vormen, die fijnverdeeld een dispersieharding van de nitreerlaag veroorzaken.

6.6.3 IONITEREN

Bij het ionitreren wordt bij verlaagde druk van enige Torr, circa 1 kPa, ongeveer eenhonderdste van de normale luchtdruk, een glimontlading in een stikstofatmosfeer opgewekt met een gelijkspanning van 300-1000 V.

Het werkstuk is kathode.

Daarboven bevindt zich een donkere ruimte, die elektrisch slecht geleidend is, en daarboven het negatieve glimlicht (roodachtig paars), dat elektrisch goed geleidend is. Deze geleidbaarheid wordt veroorzaakt door de ionisatie van de stikstofatomen.

De positieve ionen, die uit de gasvulling van de nitreeroven bij 500-600 °C zijn gevormd, bewegen zich naar de kathode. In de donkere ruimte worden ze voldoende versneld om op het werkstukoppervlak een nitreerlaag te vormen.

Door botsingen met stikstofmoleculen wordt het grootste deel van het gas gedissocieerd tot N en geïoniseerd tot N^+ .

De ontlading vindt niet alleen plaats op gedeelten van het werkstuk die zich tegenover de tegenelektrode, de anode bevinden, maar door de kathodische aantrekking ook op andere delen. Er vindt een omhulling plaats.

Het binnentreden van de stikstofatomen vindt niet, zoals bij het gasnitreren via de korrelgrenzen plaats, maar over het gehele staaloppervlak. Dit uit zich in een duidelijk verschil in eigenschappen van de nitreerlaag.

De nitreerduur varieert van enige uren tot enige dagen.

In de eerste 24 uur gaat het ionitreren sneller dan het gasnitreren; daarna verlopen beide processen ongeveer even snel.

6.6.4 NITREREN DOOR IONENIMPLANTATIE

Bij ionenimplantatie wordt een materiaal gebombardeerd met ionen van middelgrote tot hoge energie in een diep vacuüm van circa 10^{-5} Torr ($1,3 \times 10^{-3}$ Pa). In principe kunnen allerlei soorten ionen worden gebruikt, waaronder stikstof. Het proces is aanvankelijk ontwikkeld voor het vervaardigen van aan het oppervlak gemodificeerde halfgeleidermaterialen.

De technische toepassingen staan nog grotendeels aan het begin.

De apparatuur is kostbaar, en er is voor de bediening hoogwaardig opgeleid personeel nodig.

Ionen bewegen zich rechtlijnig en de laagdikte meet men in Ångstrom-eenheden ($1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$), dus zeer veel dunner dan bij gas- of ionitreren.

Het proces van ionenimplantatie -ook met andere materialen dan stikstof- wordt nader besproken in hoofdstuk 10.



6.7 ZACHT NITREREN

Zacht nitreren is een bewerking die wordt uitgevoerd in een zoutsmelt, waarbij naast veel stikstof ook koolstof in het staaloppervlak wordt gebracht. Daardoor ontstaat een nitreerlaag die in eigenschappen sterk afwijkt van zuivere nitreerlagen. Door de geringere hardheid is de laag beter bestand tegen slagbelasting, maar de slijtvastheid is minder groot (Engels: liquid nitriding).

6.7.1 CARBONITREREN

Carbonitreren is het gelijktijdig inbrengen van koolstof en stikstof in een metaaloppervlak. In wezen wordt hierbij hetzelfde bereikt als bij carboneren, want de toegevoegde stikstof dient alleen voor het veranderen van de hardingeigenschappen van de gecarboneerde laag.

Carbonitreren wordt zowel in een zoutbad (Engels: cyaniding, liquid carbonitriding) als in een gasstroom (Engels: carbonitriding) uitgevoerd.

Men onderscheidt nitrocarboneren: lagere temperatuur, veel stikstof, weinig koolstof en carbonitreren: hogere temperatuur, weinig stikstof, veel koolstof. Nitrocarboneren: 565 °C, 75% NH₃, 25% CH₄, laagdikte 80 micrometer na 6 uur.

Carbonitreren: 900 °C, 7% CH₄, rest N₂, laagdikte 100 micrometer na 2 uur.

6.7.2 TENIFEREN

Teniferen is de handelsnaam van een door Degussa ontwikkeld zoutbadcarbonitreerproces, dat in een aantal fasen wordt uitgevoerd.

Na het eigenlijke zoutbadnitreren in een cyanidische smelt bij 580 °C vindt een oxidatiebewerking plaats, waardoor het giftige cyanide wordt weggeoxideerd, zodat het afvalwaterprobleem wordt opgeheven.

Na een mechanische tussenbewerking door doekpolijsten, glasparelstralen of trommelen, waarbij een glad oppervlak ontstaat, wordt in een oxiderende zoutsmelt nabehandeld en afgeschrikt. Er ontstaat een donkerblauw glanzend oppervlak en een verbeterde corrosiewering. Het proces heet Tenifer QPQ (van Quench Polish Quench) en het heeft een grote bekendheid verkregen, ondanks de gecompliceerde bewerking.

Afhankelijk van de gebruikte staalsoorten kunnen hardheden tussen 350-800 Vickers worden verkregen.

6.8 ENIGE ANDERE VERWANTE PROCESSEN

Diverse materialen kunnen in een staaloppervlak door diffusie worden ingebracht.

.....

6.8.1 SULFINEREN

Sulfineren is het inbrengen van zwavel in een staaloppervlak met het doel de wrijvings eigenschappen van dit oppervlak te verbeteren. Het procédé wordt op beperkte schaal toegepast op stalen verspanningsgereedschappen en machine- delen die aan extreem hoge glijdende drukbelasting blootstaan. De standtijd van gereedschappen kan erdoor worden verlengd.

6.8.2 SILICEREN

Het inbrengen van silicium in een staaloppervlak dient voor het verkrijgen van een verhoogde weerstand tegen zuren, zoals zwavelzuur, terwijl ook de hitte- vastheid erdoor toeneemt. Het proces wordt als regel in kisten uitgevoerd, waarbij ferrosilicium aanwezig is naast toevoegingen, die vluchtige silicium- verbindingen doen ontstaan.

6.8.3 BOREREN

Boriumlagen, die door diffusie worden ingebracht, worden een enkele maal toegepast voor speciale doeleinden. Men verkrijgt hierbij een hard oppervlak met een grote chemische weerstand.

6.9 ANDERE DOOR WARMTE UITGEVOERDE PROCESSEN

6.9.1 VLAMREINIGEN

Vlamreinigen, ook wel vlamstralen genoemd, met behulp van een zuurstof- acetyleenvlam of een zuurstof-propaanvlam, dient voor het verwijderen van walshuid en dikke roestlagen van staal. Men gebruikt meestal een 'vlammen- bezem', bestaande uit een brander met een aantal felle, hete vlammen naast elkaar, met een steel eraan. Aanvankelijk werd uitsluitend een zuurstof-acety- leenvlam gebruikt, later is men ook propaan en LPG (een mengsel van butaan en propaan) gaan gebruiken.

De hoogste vlamtemperatuur krijgt men met zuurstof-acetyleen, namelijk tot 3200 °C.

Meestal worden branders gebruikt met een breedte van 15 cm, die een groot aantal kleine vlammetjes naast elkaar geven.

Voor vlakliggend plaatmateriaal worden ook bredere branders tot 30 cm toege- past.

Walshuid wordt door de vlam plaatselijk sterk verhit en gaat door deze warmte uitzetten.

Het kan niet uitzetten, want de walshuid ernaast blijft koud, evenals het staal eronder.

Daardoor springt de walshuid los. Door de vlammen geleidelijk over het staal- oppervlak te bewegen hoort men de walshuid losknappen.

.....

Roest bevat altijd water. Door de snelle verhitting gaat dit water plotseling over in stoom, waardoor een grote druk ontstaat en door deze expansie wordt de roest, kapotgeslagen. Van verticale vlakken zal veel roest, walshuid en vuil afvallen of worden weggeblazen. Op horizontale vlakken blijft het losgemaakte materiaal liggen.

Vlamreinigen is alleen geschikt voor zwaarder constructiestaal (dikker dan 5 mm).

Als slechts één zijde moet worden gereinigd en de andere zijde is geverfd, moet men erop bedacht zijn dat het staal tot boven 100 °C kan worden verhit. Vlamreinigen mag nooit worden gebruikt op constructies waarin veredelde bouten zijn gebruikt.

Vlamstralen is een snelle methode, maar de reiniging is niet volledig. Deze is geschikt als voorreiniging voor stralen en beitsen. Het extra transport van zwaar materiaal, zoals constructiestaal, dat het gevolg is van twee bewerkingen, wordt echter in het algemeen als hinderlijk ervaren en de totale kosten zijn ook meestal hoger, zodat men er de voorkeur aan geeft de totale reinigingsbewerking in één keer door stralen uit te voeren.

In sommige landen wordt een gevlamstraald staaloppervlak nog als voldoende beschouwd om er een verfsysteem op aan te brengen.

In Nederland vindt men deze voorbehandeling voor het aanbrengen van laklagen echter (terecht) onvoldoende.

In tropische landen met een hoge vochtigheidsgraad in de lucht past men vlamreinigen toe, om direct daarna, als het staal nog warm is, de eerste verflaag aan te brengen.

Men voorkomt dan vochtbelasting tijdens de applicatie.

6.9.2 THERMISCH ONTBRAMEN

Met thermisch ontbramen kunnen in- en uitwendige bramen van metalen onderdelen worden verwijderd.

Bij thermisch ontbramen worden de onderdelen in een drukkamer gelegd. De kamer wordt gesloten en gevuld met een brandbaar gasmengsel en het gasmengsel wordt tot ontsteking gebracht.

Door de hitte die tijdens de verbranding kortstondig optreedt, verbranden alle bramen omdat hun oppervlakte in verhouding tot volume (smalle braamvoet) groot is.

Door de warmtecapaciteit en hun volume worden de onderdelen slechts matig verwarmd.