

Het belang van koolstof voor staal en de belangrijkste uitdagingen

i ir. Bernard Vandewiele, voorzitter VWT, BVDW CONSULT

Staal is nog steeds een van de meest gebruikte materialen in onze wereld voor een veelheid van uiteenlopende toepassingen die we allemaal kennen en er gebruik van maken. Koolstof is het belangrijkste element om in het onderdeel de gewenste eigenschappen te bereiken zowel in de kern, de rand als aan het oppervlak.

BASIS BETEKENIS VAN KOOLSTOF IN STAAL

A) ALGEMEEN

Koolstof (C) is een belangrijk element en vormt de basis voor de grote opdeling in staal en gietijzer. Het bekende Fe-C toestandsdiagram (figuur 1a) geeft aan in functie van de temperatuur en het %C een overzicht over de verschillende homogene fasen die er bestaan of welke fasen die er

met elkaar in evenwicht zijn. Op basis van het %C maakt men ook de grove opdeling in staal (%C < 2%) en gietijzer. Voor staal maakt men onderscheid in hypo-eutectoïde stalen (%C < 0.8%) en hyper-eutectoïde stalen. Voor staal geeft het partieel Fe-C diagram meer duidelijkheid (figuur 1b).

Belangrijke fasen zijn op kamertemperatuur:

- ferriet (A-ferriet, kubisch ruimte gecenterd kristal rooster met weinig oplosbaar C, zacht)
- cementiet (Fe₃C, intermetallische verbinding, zeer hard en bros),
- perliet (0.8%C, bestaande uit afwisselend ferriet en cementiet lamellen).

Op hogere temperaturen (> A3):

- austeniet (Γ-fase, Kubisch vlakken gecenterd rooster; grote oplosbaarheid voor C, goed vervormbaar).

Belangrijke transformatie temperaturen zijn A1 (723°C) waarbij bij opwarmen de perliet transformeert tot austeniet en A3 waarboven homogene austeniet aanwezig is.

B) GLOEI PROCESSEN

Het %C bepaalt rechtstreeks de verhouding ferriet/perliet in de microstructuur na normaliserend gloeien. Dit diagram laat toe om de diverse gloei processen te situeren om specifieke structuren te bekomen (figuur 2) zoals spanningsarm gloeien, rekristalliserend gloeien, zacht gloeien, normaliseren, austeniteren voor harden, homogeen of diffusie gloeien.

C) MARTENSIETVORMING

Voor de praktijk zullen de meeste warmtebehandelingen vertrekken vanuit het homogene austeniet gebied en kan

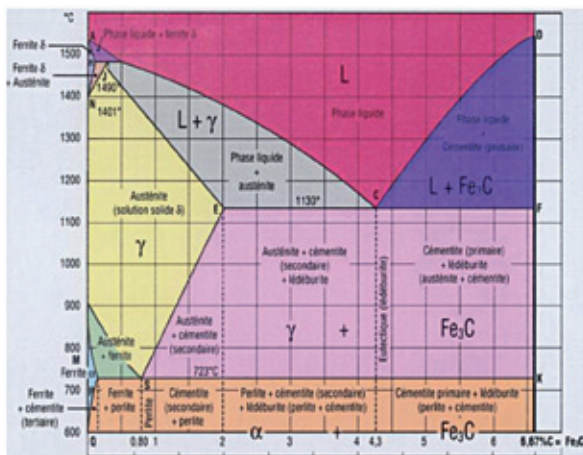


Fig. 1a: Fe-C toestandsdiagram

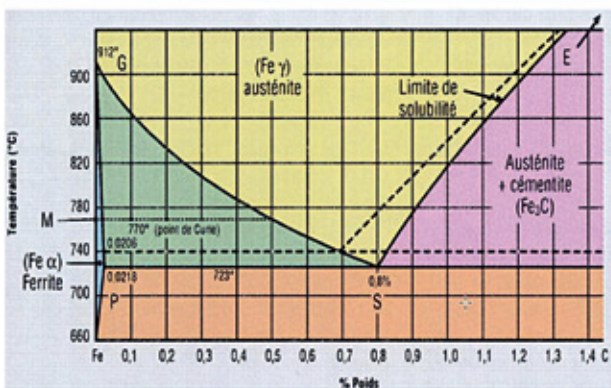


Fig. 1b: partieel Fe-C toestandsdiagram

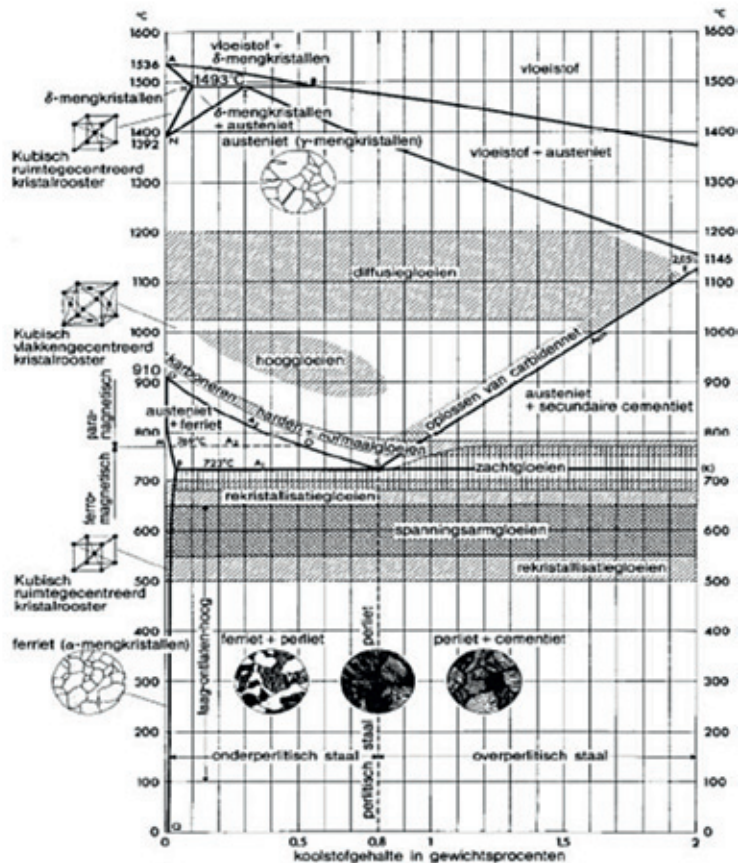


Fig. 2: gloei processen

de afkoelsnelheid sterk verschillen. De afkoelsnelheid heeft dan ook een belangrijke invloed op de transformatie van de austeniet.

Bij langzamere afkoeling (lucht) ontstaan de ferriet-perliet structuren.

Als de afkoelsnelheid hoger is dan een kritische afkoelsnelheid (karakteristiek voor de staalsoort) dan ontstaat er een diffusieloze transformatie van de austeniet tot martensiet via een omklapmechanisme die nog enkel afhangt van de temperatuur (figuur 3).

De martensiet transformatie vanaf een bepaalde temperatuur M_s (martensiet start) en eindigt bij een bepaalde temperatuur M_f (martensite finish) en als M_f lager is dan kamertemperatuur blijft er restausteniet aanwezig (figuur 4a). Het %C bepaalt rechtstreeks de maximale hardheid van de gevormde martensiet en bepaald ook in belangrijke mate M_s (figuur 4.b).

Bij tussenliggende afkoelsnelheden zullen bainiet structuren gevormd worden (hoog- laag bainiet) (intieme mengsels van ferriet en dispers zeer fijne cementiet). De hardheid en ductiliteit hangen af van

de temperatuur of het type bainiet dat gevormd wordt. (figuur 5a)

D) ONTLATEN VAN MARTENSJET: VEREDELLEN

Bij het harden zal men streven naar de maximale hardheid. Hoge hardheden vereisen een hoger %C maar dat maakt dat de brosheid toeneemt. Door de martensiet aan hogere temperaturen bloot te stellen zal deze terug ernaar streven om de evenwichtsstructuur ferriet – cementiet te bereiken. Dit gebeurt via diverse mechanismen en men noemt dit het veredelen van staal. Het resultaat is dat de hardheid afneemt en de taaiheid toeneemt zoals weergegeven in fig.5b en 5c. Belangrijk is dat staal met 0.2 à 0.25%C de hoogste taaiheid vertoont bij elk sterkte niveau.

E) ISOTHERME (TTT) EN CONTINUE KOELING DIAGRAMMEN (CCT)

Daar waar het Fe-C toestandsdiagram de evenwichtstoestand weergeeft is het in de praktijk ook belangrijk om meer dynamische diagrammen te hebben om beter de realiteit in schatten. Daarvoor bestaan er TTT diagrammen die gebruikt worden om de isotherme transformaties in kaart te

brenge (fases, % verdeling, en tijden nodig voor de transformatie) en CCT diagrammen die gebruik worden om de toestand bij continue afkoelsnelheden in kaart te brengen (fases, % verdeling, tijden nodig voor transformatie).

Dit laat toe de invloed van legerings-elementen te beoordelen zoals schematisch is weergegeven in fig. 6. Hoe meer de gebieden naar rechts verschuiven hoe beter de hardbaarheid omdat men bij tragere afkoelsnelheden toch de vorming van martensiet kan bekomen.

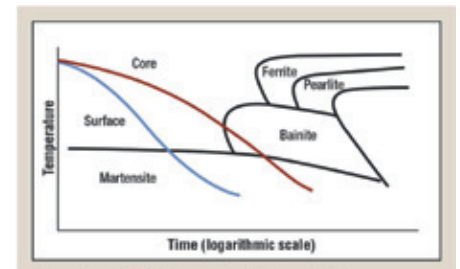


Fig. 6 : CCT diagram schematisch

OPPERVLAKTE HARDINGSPROCESSEN

Voor heel wat toepassingen zijn de belastingen het grootst in de randzone en aan het oppervlak en ook in bepaalde zones aan het oppervlak. Oppervlaktewarmtebehandelingen zijn dan ook het middel bij uitstek om hiervoor oplossingen te bieden en de componenten de gewenste eigenschappen te geven zoals microstructuur, hardheid, sterkte, vermoeiingsweerstand, slijtage weerstand, corrosieweerstand, ed.

A) THERMISCHE OPPERVLAKTE HARDINGSPROCESSEN

Men heeft de zuiver thermisch oppervlakte warmtebehandelingen waarbij de samenstelling in de rand niet gewijzigd wordt. De belangrijkste is het inductief randharden waarbij enkel de randzone opgewarmd wordt en het kernmateriaal niet. Het effect is te zien in fig. 7

De procesparameters zijn wel bekend en het komt erop aan de juiste inductor te ontwikkelen. Door combinatie van de gebruikte frequenties (dual frequency) kan de contour getrouwheid van de geharde zone verbeterd worden wat voornamelijk bij tandwielen tot applicaties kan leiden. Het feit dat de kern niet verhit en geen

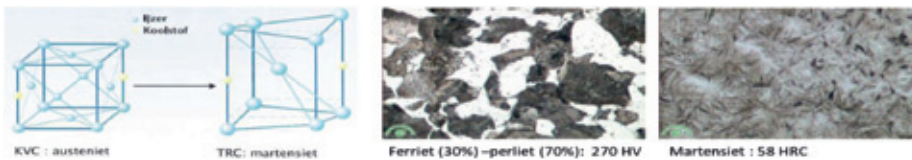


Fig 3 Martensiet rooster en microscopisch uitzicht

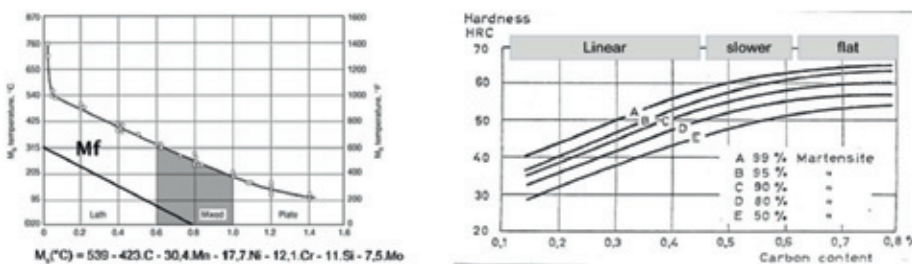


Fig 4a and 4b effect van %C op martensiet vorming

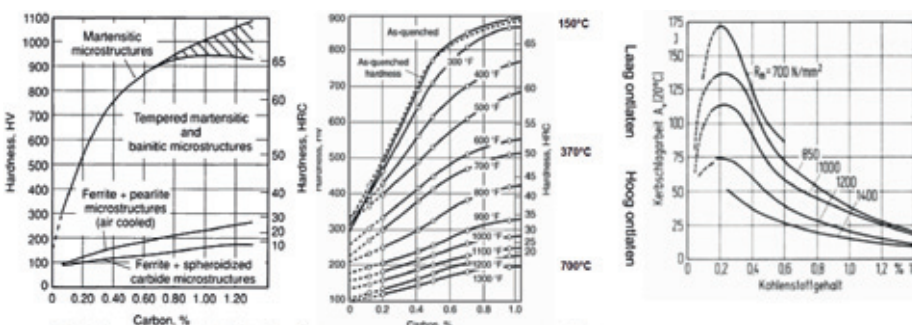


Fig 5a , 5b en 5c bainiet en ontlaten martensiet

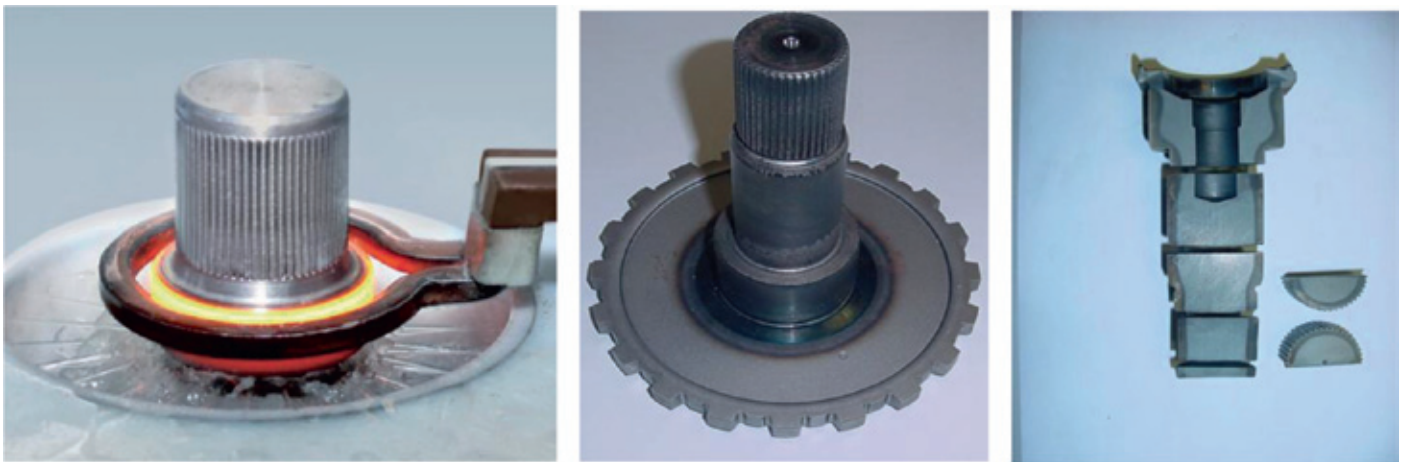


Fig. 7 inductief randharderen

transformaties ondergaat betekent dat de vervormingen intrinsiek (zeer) beperkt zijn.

Het is duidelijk dat dit soort warmtebehandeling uitermate geschikt is om in een productielijn te integreren. Uiteraard dienen de eisen voor het kernmateriaal vooraf door een warmtebehandeling gerealiseerd te worden en dient het verspanen ook op dit behandeld materiaal te gebeuren wat tot extra moeilijkheden kan leiden.

**B) THERMOCHEMISCHE OP-
PÉRVLAKE HARDINGSPRO-
CESSEN**

Daarnaast heeft men de thermochemische oppervlaktewarmtebehandelingen waarbij men in de randzone de samenstelling zal wijzigen in combinatie met de thermische behandeling. Belangrijke groepen zijn: carboneren/carbonitreren, nitreren/nitrocarboneren, PVD lagen, CVD lagen, inchromeren, ed.

Behalve bij het nitreren speelt de koolstof een belangrijke rol in combinatie met legeringselementen en geeft aanleiding tot een waaier van specifieke oplossingen zeker bij de behandelingen die zich voornamelijk aan het oppervlak manifesteren zoals PVD, CVD, inchromeren die vooral getriggerd zijn op een specifieke toepassing of op specifieke omgevingsfactoren.

Als we het carboneren nader bekijken dan wordt dit vooral toegepast op staal met een basis %C in de range 0.15 – 0.25%C. Het proces bestaat principieel uit 3 stappen: stap 1 is het realiseren van een zone met verhoogd koolstof met een optimaal randkoolstof (C_s) gehalte een zekere opkooldiepte tot een bepaalde grenswaarde C_L (C-profiel). Stap 2 is het eigenlijk afharden waarbij zowel de rand als de kern transformeert en resulteert in een hardheidsprofiel tot een bepaalde grenswaarde (HV_{lim}) en een kernhardheid. Stap 3 is een laag temperatuur ontlaten om de piekspanningen in de martensiet te verlagen zonder veel impact op de hardheid zelf. Het is zeer duidelijk dat alles wat met warmtebehandeling van staal te maken heeft in dit proces samenkomt wat het geheel compliceert. Dit is schematisch weergegeven in fig. 8.

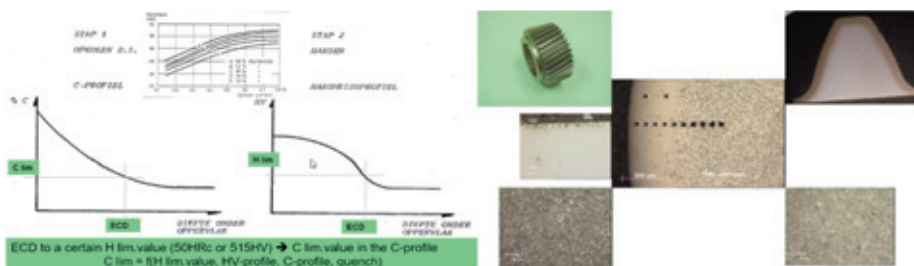


Fig. 8 : carboneren: opkolen en afharderen

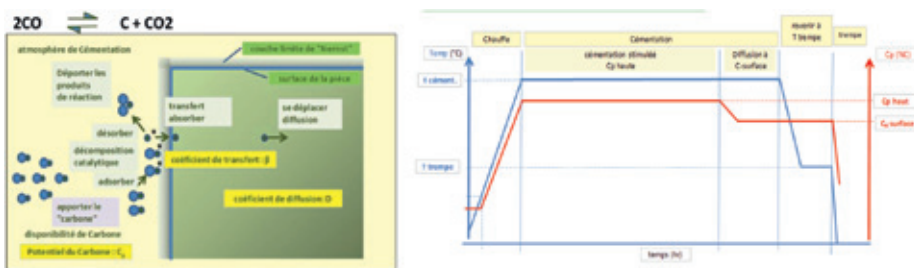


Fig. 9 : gascarboneren klassiek

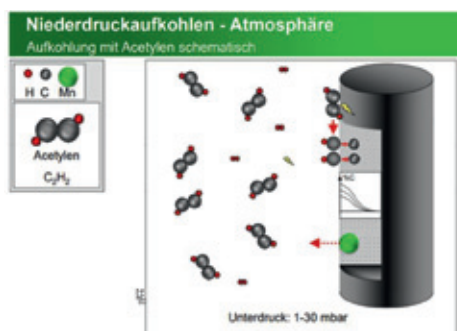


Fig. 10 : lage druk opkolen

Belangrijke fenomenen zijn de C-overdracht aan het oppervlak, de maximale %C om carbidevorming te vermijden, de diffusie met een diffusiecoëfficiënt die exponentieel met de temperatuur verbonden is (Temperatuur + 50°C is een verdubbeling van D). De wetmatigheid bij diffusieprocessen is "wortel-t" (2 maal zo diep is tijd maal 4)

Voor stap 1 wordt traditioneel gewerkt in een opkolende oven atmosfeer bestaande

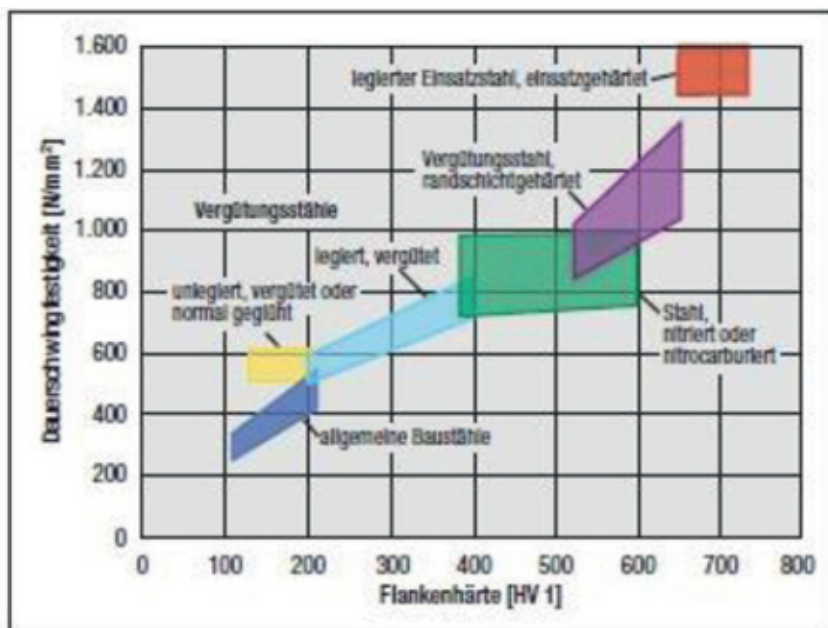


Bild 15: Dauerschwingfestigkeit von geradzahnten Stirnrädern in Abhängigkeit von der Flankenhärte nach unterschiedlicher Wärmebehandlung

Fig. 11 : vermoeing bij rechte tandwielen en type WB

uit 20%CO, 40%H₂, 40%N aangereikt met CH₄ of C₃H₈. Het gasdebiet moet voldoende zijn om een licht positieve druk in de oven te hebben zodat geen zuurstof kan binnendringen.

De activiteit van de opkolende atmosfeer wordt geregeld over de C-potentiaal of activiteit zoals die met sensoren of analysatoren gemeten wordt. Dit is schematisch weergegeven in figuur 9.

In een aantal gevallen kan men ook de koolstofoverdracht realiseren in een vacuümoven (ca 10 mbar) en gepulsd doseren van acetyleen C₂H₂. Door het afwisselen van pulsen C₂H₂ en vacuüm bekomt men een opeenvolging van “boost-diffuse” stappen en door te spelen met de verhoudingen kan men goede resultaten bereiken. Bij dit soort processen zijn er nog geen betrouwbare sensoren om het %C te meten en te sturen. Het perfect kopiëren van een bewezen recept is het enige wat op dit moment mogelijk is. Een schematische weergave is gegeven in figuur 10. Heel vaak wordt dit proces gekoppeld aan een hoge druk afschriksysteem waardoor het in principe geschikter is om te integreren in productielijnen.

Als men kijkt naar de groep van tandwielen met rechte vertanding dan geeft figuur 11 een vergelijk voor de vermoeings-

weerstand en de verschillende warmtebehandelingen. Het moge duidelijk zijn dat carboneren hiervoor zeer belangrijk is. Dit is natuurlijk ook van toepassing op andere producten.

BELANGRIJKE TENDENSEN EN UITDAGINGEN

Gezien dat de er blijvende evolutie is in de vraag naar steeds hogere eisen en naar nieuwe toepassingen is er nood om de bestaande processen continu te verbeteren en om nieuwe processen en technieken te ontwikkelen. Drijvende krachten zijn: kwaliteit, prestatie van de behandelde onderdelen, kostenbeheersing en reductie, competitiviteit met andere mogelijke oplossingen en tussen bedrijven, milieu- en wettelijke bepalingen.

Hieronder zijn enkele aspecten en uitdagingen verder toegelicht.

A) MAATVERANDERING EN VERVORMING: QUENCHING AND DISTORTION ENGINEERING

Alle fases hebben een ander specifiek volume wat betekent dat de afmetingen zullen veranderen door een warmtebehandeling, in de veronderstelling van een homogene transformatie doorheen de sectie van het onderdeel. Gezien het specifieke volume

ook afhangt van het %C speelt C dus daar ook een rol.

In de praktijk heeft men te maken met opwarmnelheden en afkoelsnelheden die verschillend zijn aan het oppervlak, randzone en kern en in functie van de massiviteit van de sectie. Hierdoor zijn thermische gradiënten en spanningen niet te vermijden en deze kunnen resulteren in blijvende vervorming en restspanningen.

Omwille van deze gradiënten zullen transformaties niet op hetzelfde moment plaats vinden waardoor er ook transformatiespanningen ontstaan die ook tot vervorming en restspanningen leiden.

Beheersing van de vervormingen is dan ook een belangrijk aandachtspunt.

Restspanningen kunnen zowel trek- als drukspanningen zijn waarbij druk eigen spanningen in de randzone positief zijn voor de vermoeingsweerstand.

Maat- en vormverandering zijn dus intrinsiek verbonden met de warmtebehandelingen.

Uiteraard zijn er voor het afschrikken diverse afkoel- en afschrikmiddelen beschikbaar en die aangepast moeten worden aan de soort warmtebehandeling, de staalsoort (hardbaarheid) en de massiviteit (sectieverschillen, overgangsradii,...) van de te behandelen stukken.

Een zuivere maatverandering kan men eenvoudig corrigeren via een betrouwbare zacht-hard relatie. Vervormingen kan men niet eenvoudig compenseren.

Waar men vroeger de vervormingen en de beheersing ervan enkel naar de warmtebehandelaar of afdeling toeschoof is er op dit moment een grote consensus dat er nog veel meer invloedfactoren zijn: materiaal (hardbaarheid), staalbereiding en smeedprocessen (segregaties, smeedstukvorm, ..), vormgeving (ontwerp, onvoldoende symmetrie, sectieverschillen en overgangen), verspanende vormgeving of andere vormgevingstechnieken vooraf aan de warmtebehandeling. De ganse productieketen is van belang. Bovendien blijkt dat de mogelijkheden bij een goed vastgelegd warmtebehandelingsproces vrij beperkt zijn naar verdere optimalisatie.

Dit heeft aanleiding gegeven tot heel wat onderzoek en een domein dat men "Quenching and Distortion Engineering" noemt en waar geregeld vrij gespecialiseerde congressen over gehouden worden. Gezien bij het carboneren zowel kern als rand getransformeerd worden is dit van uitermate groot belang.

Uiteindelijk resulteert al dit onderzoek in het kwantificeren van alle invloedfactoren en het ontwerpen van steeds betrouwbaardere numerieke modellen waardoor het mogelijk wordt om reeds in het ontwerpproces vergaand te optimaliseren waardoor problemen vermeden worden. Bovendien resulteert deze kennis ook in het ontwikkelen van optimalere afschrikmiddelen en ook nieuwe en betere afschrikssystemen.

B) MILIEU EN WETTELIJKE ASPECTEN

Het is duidelijk dat de warmtebehandelingen veel energie vragen en hebben bepaalde warmtebehandelingen met actieve atmosferen een potentiële hoge emissie aan C- en N- houdende uitstootgassen. Bovendien dient er vrij veel gereinigd te worden waardoor er ook belangrijke stroom aan te behandelen afvalwater kan ontstaan. Ook op het vlak van de afschrikoliën en andere hulpstoffen hebben wetgevingen als REACH een impact.

Dit heeft dan ook aanleiding gegeven tot veel energie efficiëntere ovens (betere isolatiematerialen, flexibelere sturing modulaire ovensystemen,...), reductie van de hoeveelheid actief gas dat nodig is door dichtere ovens en recirculatie en regeneratie van atmosfeergas. Oplossingen om restwarmte nuttig aan te wenden is sterk afhankelijk van de specifieke situatie aangezien er een zekere kritische grootte nodig is om dit economisch te verantwoorden. Dit leidt er ook toe dat in een aantal gevallen men een voorkeur geeft aan elektrisch gestookte in plaats van gasgestookte ovens. Uiteraard heeft dit ook geleid tot veel performantere recuperatieve gasbrandersystemen. Sommige milieu-eisen kunnen een zeer lokaal karakter hebben

waarbij bijvoorbeeld afschrikken met olie niet meer toegelaten is. Dit heeft tot gevolg dat bepaalde behandelingen niet meer in dergelijke regio kunnen plaats vinden. Dit geeft ook aanleiding tot een verschuiving daar waar mogelijk van klassieke ovens (warme wand) naar vacuüm ovens (koude wand) en waarbij uiteraard in vacuüm de behoefte aan actieve gassen tot een minimum kan beperkt worden.

De impact zal verder toenemen maar het blijft belangrijk dat de kwaliteit van de warmtebehandeling gehandhaafd blijft want dit is een noodzakelijke voorwaarde om goed functionerende onderdelen en systemen te hebben.

C) ONDERZOEK EN ONTWIKKELING

Er zijn heel veel invloeden die een rol spelen bij warmtebehandelingen. Hoewel een groot deel van de factoren gekend zijn, is er nog veel onderzoek nodig om diepere inzichten in de specifieke werking en vooral in de onderlinge samenhang van factoren te kennen.

Uiteraard is er reeds veel kennis beschikbaar maar dit is nog steeds onvoldoende. De betere fundamentele kennis is een noodzakelijke voorwaarde om verder te kunnen inspelen op nieuwe uitdagingen. Het ontwikkelen van betrouwbare numerieke modellen om alle reacties die bij een warmtebehandeling komen kijken, is nog steeds een uitdaging. De grootste zorg is de beschikbaarheid van betrouwbare coëfficiënten die nodig zijn om betrouwbare en voldoende fijne resultaten te bekomen. Veel van die coëfficiënten zijn van meerdere factoren afhankelijk die elkaar onderling beïnvloeden en deze zijn in een aantal gevallen nog niet bekend.

D) LEAN MANUFACTURING

Net als in alle sectoren is er een druk om de intrinsieke kosten te verlagen. Dit kan door in te grijpen in de processen zodat men op kortere tijd of in mindere stappen het gewenste resultaat kan bereiken. Voor het carboneren zal dit betekenen dat men streeft naar hogere temperaturen daar

waar mogelijk. Een belangrijke parameter is de bestendigheid van het staal tegen korrelgroei. Om optimale eigenschappen te bereiken dient het staal een fijne korrel te behouden op de hogere temperatuur gedurende de behandelingstijd. Dit is een inspanning te leveren door de staalleveranciers. In dit opzicht is lage druk opkolen gunstiger aangezien de vacuümovens tot hogere temperaturen kunnen werken dan de klassieke ovens.

Daarnaast zal men proberen het "werk in proces" te minimaliseren door reduceren of elimineren van tussenstocks en het integreren in lijn waar mogelijk om logistieke kosten maximaal te vermijden. Uiteraard zijn hier vele facetten mee in overweging te nemen.

Algemeen zal er een toename zijn van flexibele processen (snel aanpasbaar), integratie in de lijn waarbij vacuümovens (koude wand, geen explosieve of brandbare atmosferen) en hoge- gas- afschrikssystemen duidelijk een potentieel bieden. De betere beheersing en dus voorspelbaarheid van het resultaat zijn ook een noodzakelijke voorwaarden om naar "lean manufacturing" te evolueren in de warmtebehandeling. Dit is nodig over de hele productieketen. Uiteraard is er een groot verschil tussen de grote ondernemingen met eigen harderijen en de kleinere die met loonharderijen werken.

E) DIGITALISERING EN EVOLUEREN NAAR INDUSTRIE 4.0

Belangrijke drivers om hierin met de warmtebehandelingen te volgen zijn: de krachtigere computers, de numerieke methoden, de specifieke software, de elektronische apparaten, de moderne sensoren. Er zijn reeds heel wat resultaten bereikt maar het dient verder ontwikkeld te worden om de warmtebehandelingen volwaardig in een industrie 4.0 te integreren.

Wenst u bijgaande tekst met beeldmateriaal in een afzonderlijk PDF-document, stuur een mail naar info@vom.be.

In Antwerpen wordt op 25 – 27 maart 2020 een Europees congres georganiseerd met als thema "Carburizing, Carbo-nitriding and C-based surface engineering" en de subtitel "Including opportunities for industry 4.0". De organisatie berust bij de VWT (BE & NL) samen met A3TS (FR). Alle informatie en call for papers zijn te vinden op de website www.echt2020.com.