

Bij het thermisch verzinken van dikke constructiedelen treedt een grote plastische verkorting op. Vooral de temperatuurgradiënt die tijdens het verzinken in het werkstuk ontstaat, blijkt voor deze verkorting verantwoordelijk te zijn. Restspanningen spelen daarbij nauwelijks een rol. De grootte van de verkorting is moeilijk te voorspellen, maar is wel zodanig dat er bij het detailleren rekening mee moet worden gehouden. De verkortingen zijn in theorie te voorkomen door het werkstuk vóór het dompelen geleidelijk op te warmen en na het verzinken langzaam te laten afkoelen.

Thermisch verzinken van dikwandige profielen

Bij detailleren rekening houden met verkortingen

ir. L.I. Vákár

Holland Railconsult, Utrecht

De hoofdliggers voor de spoorbrug over de Cruquiuskade in Amsterdam bleken tijdens het thermisch verzinken een half promille korter te zijn geworden. Het ging hier om profielen HE 500B van ongeveer 20 m lengte, waarvan de verkorting ruim 10 mm bedroeg. Bij een ander project in Nootdorp was dit effect nog sterker: daar werden de 25,4 m lange hoofdliggers HE 550M maximaal 19 mm korter, ofwel 0,7%. Dergelijke vervormingen zijn niet te verwaarlozen. Men moet er bij het ontwerp rekening mee houden of ze zien te vermijden.

De verkorting wordt veroorzaakt door het snel opwarmen en afkoelen van een profiel tijdens het thermisch verzinken (afb. 1). Bij het dompelen van een dikwandig profiel in het zinkbad treedt aan de buitenkant een grote plastische stuik op. Bij het afkoelen na het verzinken treedt een veel kleinere plastische stuik op in het inwendige van de doorsnede. Uiteindelijk is het profiel na afkoelen korter geworden en tegelijk iets dikker. Dit verschijnsel doet zich sterker voor bij dikke profielen, wat ook uit de twee voorbeelden blijkt.

De temperatuurgradiënt over de doorsnede is zowel plaats- als tijdsafhankelijk. Daarom is het in het algemeen moeilijk de optredende verkorting te voorspellen. Het verschijnsel is echter goed te verklaren uit de verschillende be-

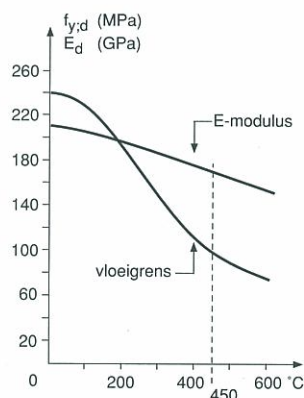
1. Onderdompelen van een werkstuk in een zinkbad.



handelingen die het profiel achtereenvolgens ondergaat. Daarbij is vooral van belang dat zowel de vloeigrens als de elasticiteitsmodulus afnemen bij hogere temperaturen (afb. 2).

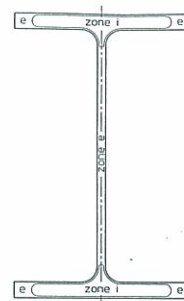
Walsen

In de doorsnede van bijvoorbeeld een I-profiel is een uitwendige zone e (voornamelijk het lijf en de uiteinden van de flenzen) te onderscheiden en een inwendige zone i (het grootste deel van de beide flenzen) (afb. 3). Bij het afkoelen vanaf de waltemperatuur (850-1000 °C) tot kamertemperatuur koelt bij de meest gangbare profielafmetingen de uitwendige zone sneller af dan de inwendige.



2. Mechanische eigenschappen van staal S355 als functie van de temperatuur.

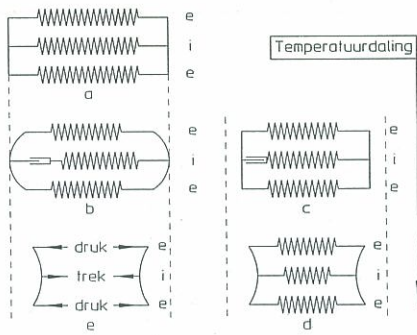
3. Inwendige zones (i) en uitwendige zones (e) van een I-profiel.



De uitwendige zone verkort daardoor sneller (afb. 4a/b). Er ontstaat een plastische stuik van de inwendige zone, aangezien bij hogere temperaturen de vloeigrens lager ligt (afb. 4c). Na verloop van tijd wordt het temperatuurverschil kleiner en koelt de inwendige zone sneller af dan de uitwendige zone. In beide zones ligt de vloeigrens nu echter veel hoger. Door de opgetreden plastische stuik is de inwendige zone 'te kort' geworden (afb. 4d) en ontstaan ter plaatse trekspanningen. Uit het evenwicht volgt dat de uitwendige zone onder druk staat (afb. 4e). Afbeelding 5 toont een karakteristieke restspanningsverdeling na het walsen van een I-profiel. Een en ander is ontleend aan [1].

Verzinken

Bij het thermisch verzinken dompelt men het profiel in een zinkbad met een temperatuur van onge-



4. Schematische vervorming van een profiel bij het walsen (afkoelen).

veer 450 °C. Bij deze temperatuur bedraagt de vloeigrens van staal ongeveer de helft van die bij kamertemperatuur, terwijl de elasticiteitsmodulus is teruggelopen tot ongeveer $170 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ (afb. 2). Structuurveranderingen treden bij een zo lage temperatuur niet op. Wel van invloed is de plotselinge opwarming met een bijzonder grote gradiënt, die ontstaat vlak na het onderdompelen in het zinkbad. De uitwendige zone warmt vrijwel direct op tot 450 °C en zet sterk uit. Gelijktijdig daalt de vloeigrens en in mindere mate ook de elasticiteitsmodulus. Bij verwaarlozing van de verandering van de uitzettingscoëfficiënt bij toenemende temperatuur bedraagt de uitzetting $\epsilon = \alpha \cdot \Delta T = 12 \cdot 10^{-6} (450 - 20) = 0,0052 = 0,5\%$. De inwendige zone van het profiel is koeler, zet minder uit en verhindert daardoor het uitzetten van de uitwendige zone (afb. 6a/b). Aan de buitenkant wordt vrij snel de verlaagde vloeigrens bereikt – ook al omdat er drukrestspanningen aanwezig zijn – en treedt plastische stuik op (afb. 6c). De maximale elastische samendrukking van S355 bij 450 °C, onder verwaarlozing van de invloed van de restspanningen, is gering en bedraagt $\epsilon = f_y/E = 100/170 \cdot 10^3 = 0,00059 = 0,6\%$. De plastische vervorming is dus vrij groot. Ter vergelijking: de maximale elastische rek bij kamertemperatuur bedraagt $\epsilon = f_y/E = 240/210 \cdot 10^3 = 0,0011 = 1,1\%$.

Na verloop van tijd wordt het temperatuurverschil kleiner en zet

ook de inwendige zone uit (afb. 6d). Doordat echter het verschil in vloeigrens tussen de uitwendige en inwendige zone kleiner is, en bovendien de elasticiteitsmodulus van de inwendige zone daalt, wordt de uitwendige zone niet plastisch opgerekt tot zijn oude lengte (afb. 6e). De uitwendige zone blijft 'te kort' door de opgetreden plastische stuik. Het staal blijft vervolgens in het zinkbad, totdat een gelijkmatige temperatuur is bereikt over de gehele profieldoorsnede.

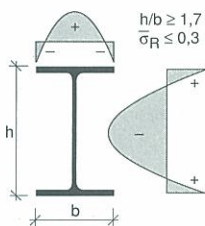
Invloed restspanningen

De restspanningen σ_R in een gewalst I-profiel in S355 bedragen ongeveer 30-50% van de vloeigrens (afb. 5) of 70-120 N/mm². Bij een profieltemperatuur van 450 °C wordt daarom de vloeigrens bijna bereikt of overschreden, afhankelijk van de aanwezige restspanningen. De maximale elastische vervorming van de uitwendige zone van een profiel in S355 bedraagt bij 450 °C maximaal $\epsilon = (f_y - \sigma_R)/E = (100 - 70)/170 \cdot 10^3 = 0,00018 = 0,18\%$ en minimaal 0%.

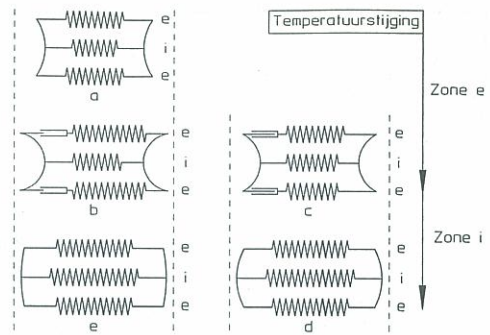
De totale uitzetting van kamertemperatuur tot 450 °C bedraagt ongeveer 5%, waarvan maximaal $0,18/5 = 3\%$ elastisch optreedt. Het meerdere veroorzaakt een plastische vervorming. De invloed van restspanningen op de verkorting bij het thermisch verzinken is derhalve gering.

Verwijderen uit zinkbad

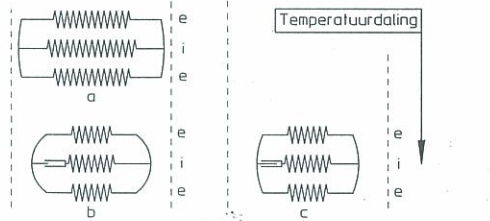
Als het profiel uit het zinkbad komt, vindt een langzame afkoeling aan de lucht plaats met een kleine temperatuurgradiënt. Het temperatuurverschil tussen de uitwendige en inwendige zone is daarbij gering. Nu koelt de uitwendige zone sneller af dan inwendige (afb. 7a/b). De inwendige zone kan hierdoor plastisch worden gestuikt: de temperatuur is hoger, dus de vloeigrens lager (afb. 7c). Na verloop van tijd wordt het temperatuurverschil kleiner en koelt het inwendige sneller af dan de buitenkant, maar de vloeigrens ligt nu veel hoger.



5. Karakteristieke verdeling van restspanningen van een gewalste I-profiel in S355. (σ_R is verhouding tussen restspanning en vloeispanning)



6. Schematische vervorming van een profiel bij het dompelen in het zinkbad (verwarmen).



7. Schematische vervorming van een profiel bij het verwijderen uit het zinkbad (afkoelen).

Bij het afkoelen kan dus ook de inwendige zone plastisch verkorten. Door de veel grotere temperatuurgradiënt zal echter de uitwendige zone na onderdompelen in het zinkbad meer stuiken dan de inwendige zone na het verwijderen uit het zinkbad. Ook nu spelen restspanningen een ondergeschikte rol.

Detailleren

Bij het detailleren van constructies moet met de relatief grote verkortingen tijdens het verzinken rekening worden gehouden door stelmogelijkheden in te bouwen. Indien de verkortingen niet door een adequate detaillering zijn op te vangen, is het beter een andere conserveringsmethode te kiezen zoals schooperen of gewoon schilderen. Bedacht moet worden dat deze beide methoden vaak een mindere bescherming van het staal geven. Een andere, meer theoretische mogelijkheid is het verkortingsverschijnsel te beperken door opwarmen.

Opwarmen

Verkortingen treden op door temperatuurverschillen tussen de inwendige en uitwendige zones van het profiel. Door te zorgen voor een zo klein mogelijke temperatuurgradiënt treedt verkorting niet of nauwelijks op. Dit is in theorie te bereiken door dikwandige profielen of werkstukken vóór het thermisch verzinken geleidelijk op een temperatuur van 450 °C te brengen, bijvoorbeeld in een oven of door ze enige tijd in de hete lucht boven het zinkbad te hangen. Pas daarna mag het werkstuk in het zinkbad worden gedompeld. Het grootste deel van de verkor-

ting treedt dan niet op. Voor een nog beter resultaat moet ook het afkoelen na het verzinken geleidelijk verlopen, vooral het begin van het afkoeltraject. Een bijkomend voordeel bij deze methode is, dat de verblijftijd van het werkstuk in het zinkbad korter kan zijn. Hierdoor treedt er een minder extreme doorgroei op van legeringslagen, wat bij dikwandige elementen vaak een probleem vormt. Deze doorgroei is mede een gevolg van de lange verblijftijd in het zinkbad, nodig om een gelijkmatige temperatuur in het werkstuk te bereiken.

In theorie is de verkorting dus te vermijden met betrekkelijk eenvoudige, algemeen bekende technieken, waarvan de meerprijs ten opzichte van 'normaal' thermisch verzinken eenvoudig is te berekenen. De kortere verblijftijd en de kleinere zinklaagdikte kunnen een economisch voordeel opleveren, waardoor de kosten van het langzaam opwarmen gedeeltelijk worden gecompenseerd.

Een praktisch probleem is echter dat bij het opwarmen van het profiel de fluxlaag verbrandt, waardoor het resultaat van het verzinken verslechtert. De fluxlaag is een zinkammoniumchloride, die zorgt voor een goede 'benutting' van het staal door het gesmolten zink. Zolang voor dit probleem (nog) geen oplossing is gevonden, moet men bij het detailleren van constructies rekening houden met mogelijke verkortingen door het inbouwen van stelmogelijkheden.

Literatuur

1. K. Roik, *Vorlesungen über Stahlbau. Grundlagen*, Berlin 1978, p. 37.