

STEFAN BRYŁA

POLITECHNIKA WARSZAWSKIEJ
Warszawa, Pl. Jedności Robotniczej 1

O naprężeniach termicznych w połączeniach spawanych.

W każdej konstrukcji występują naprężenia zasadnicze, główne, oraz naprężenia drugo- i trzeciorzędne. Nieomal zawsze uwzględnia się w obliczeniu jedynie naprężenia zasadnicze i według nich wymiaruje się konstrukcję. Naprężenia drugorzędnych zwykle się nie oblicza; powinny zmieścić się w obrębie stopnia pewności danej konstrukcji. Oblicza się je wogóle w specjalnych wypadkach, aby zdać sobie sprawę z ich wielkości. Tak np. w konstrukcjach nitowanych występują naprężenia drugorzędne z powodu sztywnych połączeń węzłowych, z powodu ekscentryczności połączeń, z powodu niedokładności wykonawczych i t. d.

W konstrukcjach spawanych powyższe czynniki mają znaczenie mniejsze, niektóre z nich nawet bardzo małe, a praktycznie żadne. Natomiast sposób wykonania połączeń spawanych, połączone z bardzo wysokimi temperaturami, powoduje naprężenie termiczne. Występują one tak w samej spoinie, jakoteż w materiale rodzimym konstrukcji.

Naprężenia wewnętrzne w spoinie spowodowane są różnicą temperatur w spoinie i w przylegających częściach konstrukcji. Jak doświadczenia wykazały, nie są one zależne od sposobu zamocowania części spawanych. Naprężenia te występują w spoinie zawsze, nawet jeżeli części łączone nie będą zamocowane uchwytami. Przyczyną powstawania ich jest rozgrzewanie się, a następnie kurczenie się strefy rozgrzanej, przy czym metal nienagrany lub mało nagrany otaczający spoinę uniemożliwia swobodne kurczenie się spoiny podczas stygnięcia. Stąd te naprężenia termiczne nazywa się naprężeniami skurczowymi, w przeciwieństwie do innych naprężeń drugorzędnych. W materiale rodzimym części łączonych powstają bowiem naprężenia t. zw. konstrukcyjne czyli montażowe wskutek unieruchomienia tych elementów zapomocą uchwytów, o czym niżej.

Im większa jest powierzchnia strefy podgrzanej, tem mniejsze będą naprężenia w samej spoinie, a większe naprężenia konstrukcyjne (montażowe). Dlatego też przy spawaniu acetylenowym występują większe naprężenia konstrukcyjne, a przy spawaniu łukiem elektrycznym większe naprężenia w spoinie.

Wielkość naprężeń wewnętrznych określa się przy pomocy pomiaru odkształceń. Wyeliminować tu jednak trzeba odkształcenia stałe, które powstają przy stanie plastycznym materiału. Dlatego sam pomiar długości odcinka przed i po spawaniu nie może być podstawą do wyznaczenia naprężeń wewnętrznych. Stosunkowo naj-

lepsze rezultaty daje tu metoda Mathar'a. Pozwala ona bowiem zmierzyć naprężenia w różnych kierunkach i wyznaczyć naprężenia główne. Jest to ważne z tego powodu, że w spoinach występuje trójwymiarowy układ naprężeń. Jeżeli porównamy współczynnik rozszerzalności termicznej stali i współczynnik wydłużalności sprężystej, to dojdziemy do rezultatu, że naprężenia te są bardzo wysokie i dochodzą czasem do granicy plastyczności. Jednakże równocześnie wskutek zahamowania odkształceń spowodowanego przebiegiem kurczenia się spoiny, granica plastyczności podnosi się, i to znacznie. Największe naprężenia występują wzdłuż osi spoiny, najmniejsze w kierunku poprzecznym. Maksimum naprężeń znajduje się w środku spoiny.

Na wysokość naprężeń wewnętrznych wpływa w wysokim stopniu grubość elementów łączonych. Naprężenia nie rosną w prostym stosunku do grubości tych elementów, niemniej wzrastają w stopniu dość znacznym.

Na naprężenie skurczowe wpływa także w wysokim stopniu długość spoin. Im spoiny są krótsze, tem naprężenia są mniejsze. Pochodzi to stąd, że naprężenia powstają wskutek sił przeszkadzających swobodnemu kurczeniu się spoin.

Wogóle w miarę wzrostu długości spoin zmniejsza się równomierność rozkładu naprężeń w nich, a w konsekwencji i ich wytrzymałość. Doświadczenia wykonane przezemnie i przez dra Poniza we Lwowie wykazały mianowicie, że wogóle — zgodnie z doświadczeniami wykonanymi w innych państwach — naprężenia na końcach spoin są znacznie większe, niż naprężenia jej w środku długości¹⁾. Ta nierównomierność jest tem większa, im spoina jest dłuższa. Wskutek tego przy pewnej długości spoiny dochodzimy do granicy, ponad którą wytrzymałość całej spoiny wzrasta minimalnie lub nawet przestaje wzrastać i praktycznie pozostaje już stała. (Podobnie zresztą w konstrukcjach nitowanych dodawanie nitów ponad pewną ich ilość nie powiększa wytrzymałości połączenia). Wpływają tu zresztą tylko w pewnym stopniu naprężenia skurczowe, sumując się z konsekwencjami sprężystościowymi połączenia. O ważnym, w pewnych wypadkach nawet dominującym wpływie tych ostatnich świadczy fakt, że podobne objawy występują przy spoinach przerywanych, gdzie spoiny skrajne niosą znacznie więcej od spoin środkowych. Rozkład naprężeń w spoinach przerywanych jest jednak bardziej jednolity.

¹⁾ Podobnie rozkładają się też naprężenia w połączeniach nitowanych — zresztą z innych powodów.

Te wysokie naprężenia w spoinach nie są jednak niebezpieczne. Siły zewnętrzne bowiem działają wogóle jednokierunkowo, zaś naprężenia skurczowe trójkierunkowo; następnie, nawet, gdy dochodzą one do granicy plastyczności, następuje ich wyrównanie. Zresztą świadczą o tym wyniki wszystkich doświadczeń doprowadzonych do przzerwania spoin i doskonałe zachowanie się dobrze wykonanych spoin. Jeżeli zdarzają się nawet od czasu do czasu — zresztą wyjątkowo — pęknięcia spoin, to przyczyną ich nie są naprężenia skurczowe, ale kruchość spoin, wykonanie z niewłaściwego materiału, lub wadliwe ich wykonanie, wreszcie karby połączenia spawanego.

Spoina zachowuje się wogóle najlepiej wtedy, gdy posiada własności możliwie zbliżone do materiału macierzystego. Chodzi tu przede wszystkim o granicę plastyczności. Dlatego niezawsze celowe jest używanie pałeczek (elektrod) z materiału o wytrzymałości znacznie większej od materiału łączonego, raczej chodzi o uzyskanie spoin o możliwie tych samych własnościach sprężystościowych. Natomiast wskazane jest stosowanie elektrod powlekanych (lub z duszą), które dają rezultaty o wiele lepsze od drutów gołych.

Istnieją rozmaite sposoby ulepszenia spoin, celem zmniejszenia naprężeń skurczowych. — Wszystkie doświadczenia z temi sposobami są raczej ujemne, gdyż nakład pracy przy nich wogóle nie opłaca się. Zmniejszenie naprężeń przez ich zastosowanie jest stosunkowo nieznaczne i bezcelowe. Wobec bowiem wielokrotnie stwierdzonej nieszkodliwości naprężeń skurczowych, niema powodu dążyć specjalnie do ich zmniejszania. Mają one znaczenie raczej inne. Np. wyżarzanie sprzyja wytworzeniu struktury drobnoziarnistej, a przez to podnosi odporność materiału na silne uderzenia. Drugostronne spawanie działa również w pewnym stopniu wyżarzająco. Podobnie działa tu przy spawaniu elektrycznym spawanie wielowarstwowe, przy którym wykonane już warstwy spoiny wyżarzane są przez warstwę następną. Dla spoin acetylenowych zwiększenie wytrzymałości na zmęczenie przez drugostronne spawanie dochodzi czasem do 50%.

Naprężenia wewnętrzne powstające w materiale konstrukcyjnym (rodzimy) podczas procesu spawania nazywamy naprężeniami konstrukcyjnymi lub montażowymi. Powstają one wskutek utwierdzania (zamocowywania) części łączonych względem siebie, przy pomocy specjalnych uchwytów o kształcie dostosowanym każdorazowo do kształtu i wielkości elementów łączonych ze sobą, oraz do przebiegu spawania danego zespołu. Uchwyty takie są konieczne, gdyż bez nich elementy spawane podczas nagrzewania i stygnięcia uległyby deformacjom i przesunięciom, niekiedy niedopuszczalnym, a zawsze niepożądanym choćby ze względu na wygląd zewnętrzny konstrukcji. Zmniejszając przez zastosowanie uchwytów odkształcenia konstrukcji do minimum lub usuwając je praktycznie w zupełności, wywołujemy w częściach łączonych jedna-

kowo naprężenia wewnętrzne proporcjonalne do zahamowanych odkształceń i przesunięć. — Wielkość tych ruchów pozostaje w prostej zależności od wielkości części łączonych i od wielkości powierzchni rozgrzanych. Dlatego też naprężenia konstrukcyjne wzrastają również odpowiednio do tych czynników w przeciwieństwie do poprzednio omówionych naprężeń skurczonych w spoinie, które od wielkości elementów łączonych są wogóle niezależne (tylko od grubości), a od wielkości strefy podgrzanej zależą odwrotnie, malejąc przy zwiększaniu strefy podgrzanej.

Naprężenia konstrukcyjne charakteryzują się też tem, że nie mają charakteru przestrzennego i tworzą układy płaskie, albo nawet jednokierunkowe. Niema też przy nich zjawiska podwyższania granicy plastyczności materiału, a wartości ich są znacznie mniejsze od naprężeń skurczonych w spoinie.

Jakkolwiek naprężenia skurczowe nie przedstawiają żadnych obaw przy należytem materiale spoin i przy ich dobrym wykonaniu i nie przekraczają wysokością swoją naprężeń montażowych w konstrukcjach nitowanych, niemniej zawsze dążymy do redukcji wszelkich naprężeń drugorzędowych we wszystkich konstrukcjach stalowych wogóle. Tem samym zaznacza się ta sama dążność o ile chodzi o konstrukcje spawane i o naprężenia skurczowe w nich. Jeżeli nie możemy ich w odpowiedni sposób zredukować po wykonaniu, to wskazane jest tak spawać elementy, aby były one odrazu możliwie małe. Należy przytem zważyć, że niektóre wpływy w pewnym stopniu wzajemnie się neutralizują. Następuje to np. w grubszych spoinach, gdzie zresztą nawet ocena wzajemnej wielkości obu wpływów jest nie ze wszystkim jasna. Spoiny cieńsze muszą być pozatem dłuższe, co znów jest raczej czynnikiem ujemnym pod względem naprężeń skurczowych. Nic dziwnego, że zdania inżynierów co do stosowania spoin grubszych czy cieńszych są podzielone. Osobiście na podstawie szeregu doświadczeń przychyliam się raczej do zdania, że lepsze i wytrzymalsze są spoiny cieńsze (są one zarazem i tańsze). Ujemny wpływ koniecznej większej ich długości można wyeliminować w ten sposób, że wykonywa się je krótkimi partjami naprzemian, a następnie wypełnia pozostawione prowizorycznie przerwy.

Drugą wskazówką, mającą znaczenie zawsze, jest konieczność stosowania pałeczek (elektrod) z materiału możliwie macierzystego pod względem zwłaszcza sprężystościowym. Zwiększenie wytrzymałości, aczkolwiek wogóle bardzo cenne, ma stosunkowo mniejsze znaczenie. Wskazane jest stosowanie elektrod powlekanych.

Wreszcie trzecią wytyczną jest możliwe łagodne kształtowanie spoin tak, aby przejście z jednego do drugiego przekroju nie następowało raptownie i z załomami, ale możliwie spływało, a kształt jeden wpływał w drugi.

Do innych czynników redukujących naprężenia skurczowe przywiązywać można znaczenie już stosunkowo drugorzędne.