

# ЗАВАРЯВАНЕ НА АУСТЕНИТНИ СТОМАНИ С ВИСОКО СЪДЪРЖАНИЕ НА АЗОТ

## WELDING OF AUSTENITIC STEELS WITH HIGH NITROGEN CONTENT

н.с. I-ва ст. маг. инж. Желязов Д.

Институт по металознание „Академик Ангел БалеВСки  
на Българската академия на науките – София, България

e-mail: [zheliazov@abv.bg](mailto:zheliazov@abv.bg)

### Резюме

В предложената работа са дискутирани проблемите, които възникват при заваряване на аустенитни стомани с високо съдържание на азот – до 0,7 %.

Разгледани са възможностите за използване на някои от разпространените заваръчни процеси и са представени насоки за преодоляване на трудностите, възникващи при заваряване на посочените стомани.

### **1. Влияние на съдържанието на азот върху свойствата на аустенитните стомани.**

Резултатите от приложните разработки в стоманодобивната промишленост показват непълното използване на въздействието на един от термодинамическите фактори – налягането за получаване на неравновесни при нормално налягане състави. Със създаването на методи и условия за легиране на стопилките с надравновесни концентрации азот се появиха и нови класове стомани един от които са аустенитните азотни стомани. Получени в условията на високо газово налягане те реализират доказано нарастване (30-150%) на физико-механичните свойства спрямо безазотните им аналози. Това неизменно води до намаляване количеството влагани скъпоструващи и канцерогенни елементи, напр. никел.

Благодарение на своето аустенитизиращо действие, азота променя свойствата на стоманите главно с образуването на твърд разтвор на внедряване в желязната матрица и свързаното с това увеличаване степента на тетрагоналност на получения при охлаждането азотист мартензит или чрез свързването си в съединения предимно с нитридообразуващите елементи в стопилката. Легирането с азот в порядъка до 0,3% води до повишаването на границата на провлачване до 300 МПа, а при 1% може да се достигне до 800 МПа.[1,2]

Съществено условие за задържане отделянето на структуросвободния азот при кристализация е достатъчното легиране на стопилката с нитридо-образуващи елементи увеличавайки неговото усвояване. Процесът е ефективен когато количеството им се намира близо до стехиометричното отношение с азота [3]. Подобен процес при леене /заваряване/ в атмосферни условия е възможен при почти всички стомани, съдържащи над 12-14% хром. От друга страна, колкото по-малко са нитридообразуващите елементи, толкова количеството разтворен азот в желязната матрица ще е по-голямо [4].

Класическите аустенитни стомани, предназначени за агресивни среди са разработени на основата на твърди разтвори на заместване, което определя ниските им якостни характеристики. Провежданите експерименти за уякчаване на корозоустойчивите никелови стомани с въглерод в съчетание със силни карбидообразователи от типа на титана не водят до очаквания стратегически ефект. Азотът образува твърд разтвор на вместване и с това се обяснява по-високата термическа стабилност на азотистия аустенит в сравнение с въглеродния.

От проведените широк спектър изследвания върху аустенитни стомани с концентрации на азот от 0,2 до 1,7%, 2-20% Cr, 2-21% Mn, 2-28% Ni и техните въглеродни аналози може да се обобщи следното [5]:

1. Азотистият аустенит има по-ниска енергия на дефектите на подреждането в сравнение с въглеродния, тоест има широко разклонени подвижни дислокации свързани с тях. На практика това означава относително по-висока стабилност на аустенита при термически операции и обезпечаване на достатъчно деформационен мартензит в експлоатационни условия при големи натоварвания.

2. Енергията на активация на дифузията на азота в аустенита е значително по-голяма от тази на въглерода. Студената пластична деформация при високоазотните стомани води до повишаване ѝ. Получават се структури с висока плътност на дислокациите, което позволява създаването на стомани с повишени характеристики – якост, пластичност, корозоустойчивост и др.

### **2. Проблеми при заваряване на стомани с високо съдържание на азот**

Един от основните проблеми за реализирането на технико-икономическите преимущества на азотните аустенитни стомани е тяхната заваряемост. И ако при методите при които не се образува течна фаза (точково, ролково и др.) проблемите са решими, то при заваряване, свързано с образуване на по-голями обеми течна фаза, високите концентрации на азота създават ред затруднения, свързани с отделянето му в структурно свободно състояние.

Главните проблеми, които възникват при заваряване на стомани с високо съдържание на азот са в две групи.

В първата група спадат проблеми, свързани с постигане на желаните механични характеристики на заварените съединения. Обикновено стремежът е да се постигнат механичните показатели на основния метал.

В процеса на заваряване част от азота напуска заваръчната вана. Причината е, при условията на заваряване, а именно висока температура на течния метал и ниско налягане (равно на атмосферното) концентрацията на азот в заваръчната вана е по-висока от равновесната. В резултат намалява концентрацията на азот в метала на шева, което води до понижаване на механичните характеристики на заваръчния шев.

**Втората група** включва проблеми, свързани с постигането на плътни шевове. Част от основния метал се стопява и участва в състава на заваръчната вана. Както беше посочено по-горе при условията на заваряване концентрацията на азот в заваръчната вана е над равновесната. Разтвореният азот се отделя от метала, образува газови мехури, част от които не успяват да напуснат заваръчната вана, биват захващани от растящите кристалити, остават в кристализиращият метал на шева и се получават пори в шева.

Решението на проблемите при заваряването на азотните аустенитни стомани е тясно свързано с определяне на количеството азот оставащ в заваръчния шев. Изследванията на разтворимостта и дифузията на азота в различните легирани системи [6,7] показват че в температурните интервали 900-1400°C и 1550-1800°C закона на Сивертс е валиден, като процесите се определят главно от химическия състав на стоманата и парциалното налягане на азота в атмосферата. Анализът на "С" кривите на отделяне на нитридни фази в Cr-Ni и Cr-Ni-Mo стомани със съдържание на азот 0,02-0,14% показват, че с увеличаване концентрацията на азот се разширява температурния интервал на отделяне и се намалява инкубационния период на зародишообразуване. При заваряване в условията на бързо непрекъснато нагряване и охлаждане вероятността за образуване на нитриди се намалява.[1] Изхождайки от тези съображения може да се предполага, че азота при горещитраните концентрации и условия на заваряване се намира в разтворено състояние в основния и наплавения метал. Под влияние на температурното поле протича преразпределение на азота в заваръчната вана чрез конвекция и дифузия, а в основния метал само чрез дифузия. Конвективната съставна може да се отчете приемайки завишени коефициенти на дифузия в пределите на стопения метал. Влиянието на температурата се изразява не само чрез температурната зависимост на коефициентите на дифузия и разтворимостта, но и чрез термодифузията предизвикана от градиента на температурата. Все още не са ни извесни данни за влиянието на електромагнитното поле, напрегнатото и деформационно състояние на детайлите и силите на повърхностно налягане в заваръчната вана.

### **3. Класификация на аустенитните стомани според съдържанието на азот**

Отчитайки поведението при заваряване на азотните аустенитни стомани в зависимост от съдържанието на азот можем да ги разделим в следните групи:

1. Стомани с ниско съдържание на азот – до 0,34%. Те притежават добра заваряемост, т.е. могат да се заваряват без проблеми с почти всички заваръчни процеси.
2. Стомани с високо съдържание на азот – от 0,34% до 0,7%. Тяжната заваряемост е ограничена. Това означава, че трябва да се прилагат подходящи заваръчни процеси и да се вземат специални мерки за осигуряване на качеството на заварените съединения.
3. Стомани със много високо съдържание на азот – над 0,70%. Тяжното заваряване е изключително трудно и предполага използването на специални заваръчни процеси.

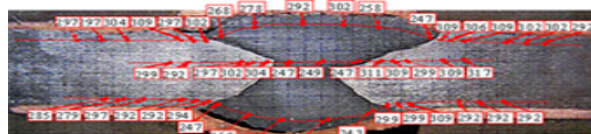
### **4. Възможности за използване на заваръчни процеси с ниска плътност на енергията**

#### **4.1. Ръчно електродъгово заваряване с обмазани електроди (заваръчен процес 111 съгласно БДС EN ISO 4063)**

Проведените изследвания с предварителен характер позволяват да се заключи, че е възможно чрез процесът „Ръчно електродъгово заваряване с обмазани електроди да се получат плътни шевове, с механични показатели, които са равностойни на тези на основния метал (фиг.1).



Фиг. 1. Външен вид на заварено съединение с процес 111



Фиг. 2. Макроструктура на заварено съединение с процес 111

За тази цел в Института по металознание на БАН съвместно с Института по заваряване и Завод за електроди в гр. Ихтиман е създаден подходящ обмазан електрод за ръчно електродъгово на аустенитни стомани с високо съдържание на азот E-12X26N7M2Г5А. С него успешно може да се изработват заварени конструкции от аустенитни стомани с високо съдържание на азот.

Трябва да се отбележи, че металът на шева не е чисто аустенитен. Той е двуфазен – аустенитно-феритен. Доколко това е недостатък зависи от предназначението на заварената конструкция, т.е. при какви условия тя ще работи. В много случаи плътен и с високи механични показатели аустенитно-феритен шев се оказва приемлив.

Уязвима част на заваръчното съединение се оказва зоната на термично влияние поради отделяне на нитриди от типа Cr<sub>2</sub>Ni на границата на зърната, като количеството им нараства с увеличение на времето на престояване при 800-900°C и с увеличаване концентрацията на азота в основния метал.

При правилно подбрана технология за заваряване се осигурява еднаква якост на съединението с основния метал за стомани с Rm ≤ 900MPa. Понижаването на количеството Cr<sub>2</sub>Ni може да се осъществи чрез намаляване количеството вложена топлина и повишаване скоростта на охлаждане.

#### **4.2. Заваряване в среда от активен или инертен защитен газ и топящ се плътен електроден тел (МАГ- и МИГ заваряване, заваръчни процеси съгласно БДС EN ISO 4063)**

Освен посочените по-горе два главни проблема тук се явява още един сериозен проблем, а именно липсата на подходящ допълнителен материал. Нито една фирма не произвежда и не предлага подходящ електроден тел за заваряване на аустенитни стомани с високо азотно съдържание. На практика този проблем е непреодолим защото производството на такъв заваръчен тел е сложно и скъпо. Освен това в обозримо бъдеще не се очертава масово използване на аустенитни стомани с високо азотно съдържание

и това прави производството на заваръчен тел за тях крайно нерентабилно.

Ясно е, че тези заваръчни процеси са неприложими за заваряване на аустенитни стомани с високо съдържание на азот.

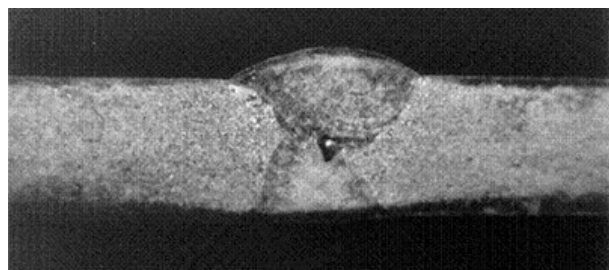
*4.3. Заваряване в среда от активен или инертен защитен газ и топящ се тръбен електроден тел (МАГ- и МИГ заваряване, заваръчни процеси съгласно БДС EN ISO 4063)*

Друга съвременна възможност е МАГ- или МИГ-заваряване с тръбен електроден тел. Вярно е, че производството на подходящ тръбен електроден тел е по-лесно, по-евтино и по-рационално в сравнение с производството на плътен електроден тел. Възможни са различни комбинации в състава на пълнежа на тръбния електроден тел. Така сравнително лесно се получава гама от тръбни електродни телове с различни свойства.

Засега, обаче, на пазара липсват тръбни телове, подходящи за заваряване на аустенитни стомани с високо азотно съдържание, което прави и тези заваръчни процеси засега неприложими за целта.

*4.4. Заваряване в среда от инертен защитен газ и нетопящ се волфрамов електрод (ВИГ-заваряване, заваръчен процес 141 съгласно БДС EN ISO 4063).*

Проведените експерименти върху стомани 06X18AG12, 03X18AG20AF и 03X20G12AC4 с използване на добавъчен тел СВ-03X19Н15Г6М2АВ2 в импулсен режим установяват режими на заваряване осигуряващи сравнително добри качества на заваръчните шевове. Наблюдава се снижаване с 10-15% на азота в шева при стоманите с 0,8% азот, при което якостта му намалява до 80% от тази на основния метал. Използването на ВИГ-заваряването при нормални условия не позволява да се получат качествени заваръчни шевове. Причината е интензивното навлизане на азот от основния метал в заваръчната вана и образуване на множество пори в метала на шева (фиг.3).



Фиг. 3. Външен вид и макрошлиф на заварено съединение с процес 141

И при този заваръчен процес възниква същият допълнителен проблем, както и при МАГ, МИГ-заваряването. Липсва на пазара подходящ допълнителен материал, а не е възможно да се произведе електроден тел в „домашни условия“. Но при този заваръчен процес има една опция – заваряване без допълнителен материал на тънки части.

Проведените експерименти показваха, че е възможно получаването на плътни шевове само в условията на контролирана атмосфера и достатъчно високо налягане. Това означава, че е необходима специална камера, в която да се осигури подходяща газова атмосфера при съответно налягане. Камерата трябва да бъде оборудвана със система за механизирани движение на заваръчната горелка и система за контрол и управление на процеса. Тези изисквания силно ограничават възможностите за практическо приложение на ВИГ-заваряването (заваръчен процес 141).

## **5. Възможности за използване на заваръчни процеси с висока плътност на енергията**

### *5.1. Лазерно заваряване*

Линейната енергия на лазерното заваряване на високоазотна стомана Х18АГ12 с дебелина до 5мм в условията на дълбоко проваряване е от 3 до 5 пъти по-малка от линейната енергия при електродъговото заваряване. В резултат времето на пребиваване на метала в течно състояние намалява, а скоростта на охлаждане се увеличава до един порядък в сравнение с термичния цикъл при ВИГ заваряването. Същевременно размерите на различните области на зоната на термично влияние значително се стесняват, а структурата издребнява. Тези особености на формиране на съединенията са причина за постигане на високи якостно-пластични свойства на метала, независимо че структурообразуването е от мартензитно-бейнитен и мартензитен тип. Сравнението по отношение устойчивост на пукнатинообразуване при ВИГ и импулсно лазерно заваряване показва по висока устойчивост на заварените съединения след лазерното въздействие въпреки високата скорост на охлаждане.

Заваряването на пластини с дебелина 2мм и 6мм от стомана Х12АГ12 с непрекъснат СО<sub>2</sub> лазер показва намаляване на съдържанието на азота в шева до 70-78% при защитен газ Аг и 77-88% при използване на N<sub>2</sub>, което води до намаляване на якостта респективно до 83-87% и 88-92% от тази на основния метал. Корозионната устойчивост също намалява.

### *5.2. Електронно-лъчево заваряване (заваръчен процес съгласно БДС EN ISO 4063).*

Към предимствата на електронно-лъчевото заваряване могат да се посочат следните предимства:

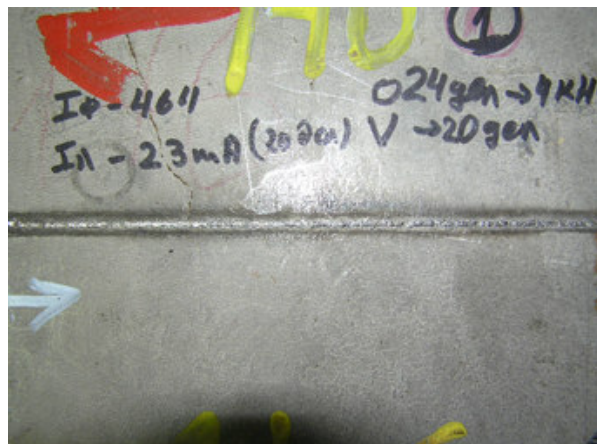
- Не е необходим допълнителен заваръчен материал;
- Висока концентрация на енергия, което води до висока скорост на заваряване и малка (тясна) заваръчна вана;
- Тясната заваръчна вана означава стопяване на минимално количество от основния метал при което в заваръчната вана ще постъпи малко количество азот от основния метал;
- Високата концентрация на енергия, голямата скорост на заваряване и малката заваръчна вана причиняват „твърд“ термичен цикъл, характеризиращ се с висока скорост на нагряване и охлаждане. Това дава основание да се счита, че азотът няма да може да се отдели в атмосферата и заваръчният шев ще запази високи механични показатели. От друга страна, обаче, вакуумът в камерата ще има противоположен ефект,

т.е. ще спомога за отделяна на азота от заваръчната вана.

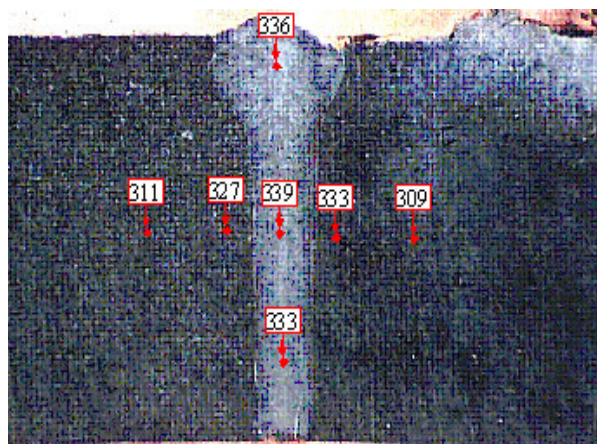
- Предполага се, че при тези условия ще се получат плътни заваръчни шевове, тъй като азотът ще остане разтворен и свързан в метала.

Известен недостатък на електронно-лъчевото заваряване е необходимостта от вакуумна камера, в която да се реализира заваръчния процес. Това обстоятелство безспорно ограничава приложението на електронно-лъчевото заваряване.

Проведените експерименти с предварителен характер показаха, че е възможно да се получат плътни заваръчни шевове с пълен провар. Проблем остава постигане на заварено съединение с механични характеристики, еквивалентни на основния метал.



Фиг. 4. Външен вид на заварено съединение при електронно-лъчево заваряване.



Фиг. 5. Макроструктура на заварено съединение при електронно-лъчево заваряване.

Ясно е, че за да се преценят възможностите да се използва този процес за заваряване на аустенитни стомани с високо съдържание на азот при производството на заварени конструкции е необходима задълбочена научно-изследователска работа.

#### Литература:

1. Grütznert, G., Kornzerfallsanfälligkeit Stickstofflegierter austenitischer Crom-Nickel-Stähle durch Crom-nitrid ausscheidungen. Stahl u. Eisen 93, N1, S9/18
2. Ющенко, К. А. и др. "Воздействие азота на структуру и свойства эtv сварных соединений сталей легированных титаном и ванадием", Авт. Сварка 41, 10, с 20/22
3. Димов И., Колев Б., "Върху някои технологични въпроси на усвояването на азот в леярски сплави", Мат. и технология, № 13, БАН, 1984
4. Калев Л., Колев Б., "По някои термодинамични въпроси на насищане на стопилка на желязна основа с азот под налягане при атмосферни условия", Мат. и технология, № 5, БАН, 1977
5. Рашев Ц., "Високо азотные стали" – Издателство БАН 1997
6. Kunze H. D., Diffusion des Stickstoffs in flüssigen eisenreichen Mehrstofflegierungen“, Arch. Eisenhüttemwes, 44. № 3, s 173-179
7. Димова В., Разтворимост на азота в твърди желязо-хром-манганови сплави при налягане 1 атм. В температурния интервал 1000-1440°C, Мат. и технология, № 6, БАН, 1978, 9-13 стр.