

## Влияние на индукционното нагряване върху свойствата на съединение твърда сплав - стомана

Теофил Ямболиев

*Effect of induction heating on the properties of a hard metal steel joint: This work aims to explain the origin of defects in joints between hard metal plate and steel backer subjected to diffusion bonding using induction heating. It was found that at a close clearance between induction coil and sample the joint tensile strength was low and there was a poor reproducibility. The brittleness of the joint was related to an overheating of the hard metal plate, causing melting, and cracking.*

**Keywords:** hard metal, diffusion bonding, induction heating, brittleness, cracking

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Дифузионното заваряване е често използван метод за получаване на съединения твърда сплав-стомана [1-7]. Нагряването се осъществява често индукционно. Топлината се отделя на повърхността на детайлите, а вътрешността им се загрева чрез топлообмен [9, 10].

Важен параметър на индукционното нагряване е хлабината между индуктора и детайлите. Намаляването ѝ увеличава ефективността на нагряване, но преминаване под критичната ѝ стойност предизвиква прегряване. Критичната стойност на хлабината зависи от топлофизическите свойства на материалите.

В предишни изследвания върху дифузионно заваряване с индукционно нагряване на твърди сплави и стомана е установено, че недостатъчната хлабина води до частично стопяване на твърдата сплав, последвано от образуване на пукнатини и окрежестяване на съединението. Изказва се предположението, че използваната скорост на нагряване 50 и 100 °C/мин е твърде висока и чрез понижаването ѝ стопяването би могло да бъде предотвратено [4, 11-13].

Настоящата работа представя резултати от допълнителни изследвания, които отразяват влиянието на режима на заваряване върху механичните свойства на съединението.

### 2. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Опитното тяло е съставено от твърдосплавна пластина от тип BK20 (20 % Co) с размери  $\Phi 13 \times \Phi 2 \times 3$ , която се заварява между цилиндрични заготовки с размери  $\Phi 13 \times 58$  от стомани X12Ф1. Твърдосплавната пластина има грапавост на челата Ra 0.63 мкм, а стоманените заготовки – Ra 5 мкм [1-7]. От двете страни на твърдосплавната пластина се поставя вложка от технически чист Ni, която облекчава дифузията и понижава остатъчните напрежения [1, 2, 4-7].

Индукторът има 1.5 бр. навивки. Едностранно хлабината между него и опитното тяло варира в границите 2-3.5 мм поради неконцентричност. Причините за нея са две: а) нецилиндричност на индуктора; б) случайни грешки при установяването на опитното тяло.

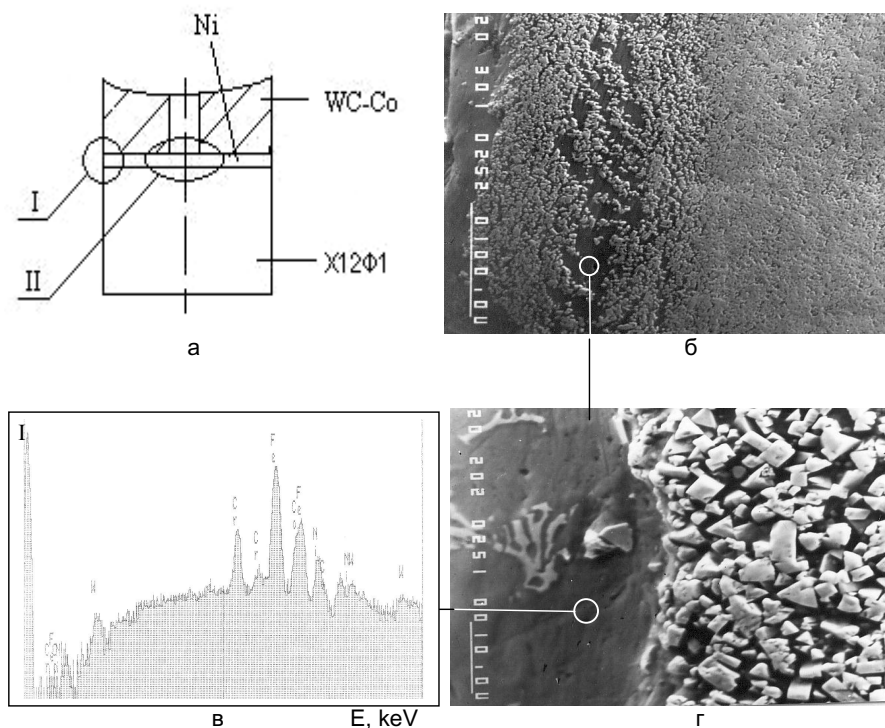
Температурата на нагряване се управлява с термодвойка хромел-алумел, закрепена върху една от цилиндричните заготовки на разстояние 0.5 мм от вложката. Параметрите на режима на заваряване се изменят в границите: температура 1000-1050 °C, налягане 12-18 МПа, време на задържане 10-25 мин, разреждане в камерата  $5 \cdot 10^{-4}$  Па, скорост на нагряване 25 °C/мин, начин на охлаждане: във вакуум до 300 °C, следва подаване на въздух в камерата и охлаждане до стайна температура. Честотата на напрежението е 8 кГц. На един и същи режим са проведени по 2 - 3 опита.

Завареното съединение е изпитано на опън. Изследван е ломът на разрушения образец. Микроструктурата на съединението е изследвана с оптически и сканиращ електронен микроскоп. Проведен е локален микроанализ в точка. Подробно описание на методиката се съдържа в [11, 12].

### 3. РЕЗУЛТАТИ

#### 3.1 Якост на опън

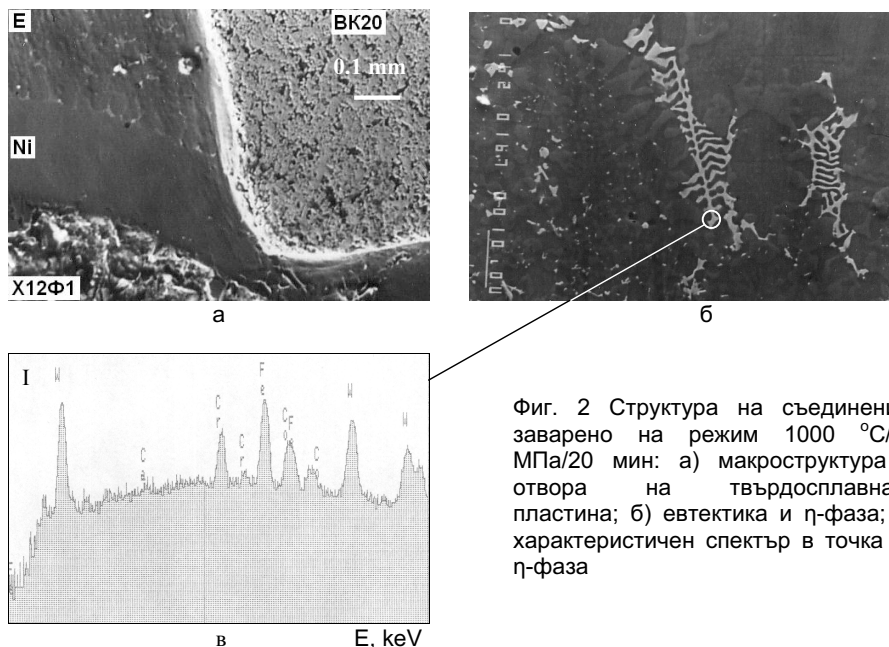
Независимо от режима на заваряване якостта на опън на завареното съединение е относително ниска и варира в границите 120-250 МПа. За образци, заварени на един и същи режим, тя се изменя скокообразно, напр. за образец 71 - 150 МПа, и за образец 72 - 250 МПа, т. е. липсва повтаряемост. Разрушаването протича през твърдосплавната пластина. Ломът е крехък. По околната повърхност на пластината след заваряване се забелязват тъмни петна. Подобни резултати са установени и по-рано [11-13].



Фиг. 1 Микроструктура на съединение, заварено на режим 1000 °C/17 МПа/15 мин:  
 а) схема на образца след изпитване на опън; б) участък I - пукнатина в твърдосплавната пластина; в) характеристичен спектър в точка от евтектиката; г) евтектика и η-фаза в пукнатината

### 3.2 Микроструктура на заварените съединения

На фиг. 1, а е показана схема на разрушен образец след изпитване на опън с означени характерни участъци на съединението. В участък I на разстояние около 10 мкм от повърхността на твърдосплавната пластина е установена пукнатина, фиг. 1, б. Тя е запълнена с евтектика, в която са разпръснати единични или групи зърна от WC и образувания от  $\eta$ -фаза с характерна морфология фиг. 1, г [7, 12, 13]. В характеристичния спектър, получен в означения участък на евтектиката, пикът на Fe и Cr е съизмерим с този на Co. Следва, че тя е богата на Fe и Cr. Това е изненадващ резултат, тъй като по начало BK20 съдържа само WC и Co. Наличието на Fe и Cr се дължи на пренос чрез дифузия откъм стоманената част през Ni-вложка по време на заваряване, регистрирано в [12]. Евтектика със същите свойства е установена и по околната повърхност на образеца, както се вижда в левия край на фиг. 1, б. Поглед отвън върху повърхността му е представен на фиг. 3, б.

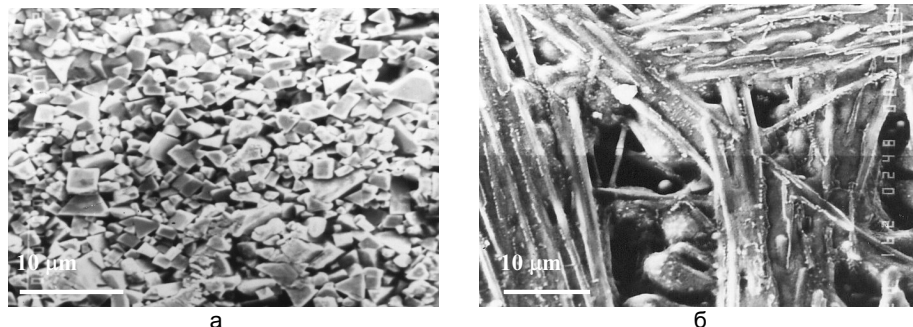


Фиг. 2 Структура на съединение, заварено на режим 1000 °C/12 МПа/20 мин: а) макроструктура в отвора на твърдосплавната пластина; б) евтектика и  $\eta$ -фаза; в) характеристичен спектър в точка от  $\eta$ -фаза

На фиг. 2 е показана микроструктурата на съединение, заварено на режим 1000 °C/12 МПа/20 мин, в участък II, който обхваща отвора на твърдосплавната пластина. Под действие на приложения натиск и пластична деформация вложката и стоманената заготовка са навлезли частично в отвора  $\Phi 2 \times 3$  мм на твърдосплавната пластина. Над междинния слой от Ni до ръба на твърдосплавната пластина е разположена евтектика, която по морфология и характеристичен спектър не се отличава от евтектиката на фиг. 1, г. Аналогично и тук е регистрирана скелетообразна фаза с морфология и характеристичен спектър според фиг. 2, в. Високите пикове на W и Co сочат, че вероятно това е  $\eta$ -фаза [7], установена и в предишни изследвания, [12, 13].

Околната повърхност на твърдосплавна пластина преди заваряване е показана на фиг. 3, а. Изградена е от зърна на WC. След заваряване на режим 1000 °C/17

МПа/15 мин повърхността е покрита с първични дендрити, фиг. 3, б, заличили първоначалния зърнест строеж.



Фиг. 3 Вид на околна повърхност на твърдосплавната пластина: а) преди заваряване; б) след заваряване на режим 1000 °С/17 МПа/15 мин

### 3.3 Анализ на резултатите

Неравномерната хлабина между индуктора и заваряваните детайли предопределя неравномерното им нагряване.

В интервала 1225 – 1298 °С в твърдата сплав се образуват три тройни евтектики от типа  $\gamma+\eta$ +графит, в които  $\gamma$  е твърд разтвор на W и C в Co, а  $\eta$ -фаза е двоен карбид от типа  $W_3Co_3C$ ,  $W_4Co_2C$  и др. [7, 8]. Фаза  $\eta$  се образува при ниска скорост на охлаждане и частично обезвъглеродяване от 6.12 % C до по-малко от 6.06 % C в интервала на кристализация при спичане на твърдосплавната пластина. Скоростта на охлаждане при дифузионно заваряване е от порядъка на тази при спичане и при 1000 °С има стойност 40-100 °С/мин в зависимост от режима на заваряване.

Въпреки че зададената за заваряване температура е 1000-1050 °С, евтектиката свидетелства, че действителната температура превишава 1225 °С. В резултат на прегряването в участък I се образува течна фаза, която вероятно разтваря частично циментиращата Co-връзка между зърната от WC [7, 8]. Свързващото действие на Co отслабва допълнително поради частично изпарение на Co при заваряване във вакуум [7]. Тези два фактора – стояване и загуби на Co, намаляват силата на взаимодействие между зърната и под действие на приложеното налягане възниква пукнатина. Благодарение на повишената си тънколивкост евтектиката я запълва и заличава.

Вероятна причина за допълнително окрежкостяване е образуването на междуметалното съединение FeCo [8]. Разликата в концентрациите на Fe под и над Ni-та вложка в съчетание с продължителния процес и висока температура на заваряване облекчават дифузията на Fe към твърдата сплав [12]. За участието му в състава на евтектиката, обогатена с Co, допълнителна движеща сила е наличието на взаимна разтворимост между Fe и Co в течно и твърдо състояние [7, 8]. Относително ниската скорост на охлаждане след втвърдяване на евтектиката създава благоприятни условия за образуване на FeCo.

Дендритите, наблюдавани по околната повърхност на твърдосплавната пластина, са доказателство за настъпване на стояване и втвърдяване. Те имат евтектичен характер, поради което са крехки и често осеяни с пукнатини, [12].

Наличието на изброените фактора - евтектика,  $\eta$ -фаза, разтваряне и изпарение на Со-връзка, както и евентуалното наличие на междуметалното съединение FeCo, предизвикват окрежкостяване, установено в завареното съединение.

#### 4. ИЗВОДИ

Хлабина между индуктора и заваряваните детайли, несъобразена с топлофизическите свойства на твърдата сплав предизвиква частично стопяване с образуване на евтектика и отслабване на циментиращата Со-фаза. Тази структура е крехка и определя свойствата завареното съединение. Понижаването на скоростта на нагриване до 25 °C/мин не предотвратява стопяването.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков, Н. Дифузионна сварка материалов, М., М-е, 1981.
2. Cotterden, A. and Almond, E. Hard metal interlayered butt-joints made by diffusion bonding and pressure bonding. *Metals Technology*, 1981, June, pp. 221-233.
3. Ямболиев, Т. Свързване на инструментални материали чрез дифузионно заваряване, "Машиностроене", 2003, 4, 14-15.
4. Wiesner, P. Diffusionsschweißen von Hartmetallwerkzeugen. Sonderdruck aus DVS Berichte, Band 148.
5. Kùbarsepp, J., Klaasen, H., Laansoo, A. Compound carbide composites, *Proc. Of Euro PM2001*, vol. 1, Nice, 2001, 158-163.
6. Klaasen, H. и др. Diffusion- and sinterbonding processes to produce compound hardmetal parts. *LÖT 2001*, с. 1-4.
7. Третьяков, В. К. Металлокерамические твердые сплавы. М., Гос. Научно-техн. издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962 г.
8. Brooks, Kenneth, J. R. *Hardmetals and other hard materials*, Int. Carbide Data, London, 1992.
9. В Слухоцкий, А. и др. Индукторы для индукционного нагрева, Л., Энергия, 1974 г.
10. Безручко, И. Индукционный нагрев для объемной штамповки, Л., Машиностроение, 1987 г.
11. В Ямболиев, Т., Колева, В. Особенности при дифузионно заваряване на инструментални материали. Сб. докл. от межд. научна конф. "AMTEX 2005", т. 44, серия 2, ВТУ, Русе, 2005, с. 217-222.
12. Iamboliev, T., Valkanov, S. Behaviour of hard metal steel joint obtained under induction heating diffusion bonding. *Proc. of the 1<sup>st</sup> South-East European Welding Congress "Welding and joining technologies for a sustainable development and environment"*, Timisoara, Romania, May 24-26, 2006, p. 197-206.
13. Ямболиев, Т., Колева, В. Дефекти вследствие индукционно нагриване в съединение твърда сплав – стомана. Юб. научна конф. ' 2006, Сб. научни тр., ТУ София, ф-л Пловдив, том 13, с. 75-80.

#### Благодарност

Авторът благодари на инж. В. Колева и н.с. С. Вълканов за оказаното съдействие при провеждане на изследването.

#### За контакти:

Доц. д-р инж. Теофил Ямболиев, катедра "Машиностроителна техника и технологии", ТУ София, филиал Пловдив, тел.: 032-659622, E-mail: [tiamb@tu-plovdiv.bg](mailto:tiamb@tu-plovdiv.bg)

Докладът е рецензиран.