



Guidelines for the Use of the Standard ISO 18166 in Welding Processing

Manahil TONGOV

Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria, Phone ++359 2 965 3475, e-mail: tonfov@tu-sofia.bg

Abstract

This report examines the possibilities of using computer equipment and software in the design of technological processes of fusion welding and their regulation by ISO 18166. The main concepts defined in the standard, description of the problem, the working process, the specifics of defining the welds, material properties, heat sources, validation and verification of the built models and the requirements for the shaping of the results are discussed. An example is given to clarify the basics of the standard.

Keywords: welding, modeling, ISO 18166, temperature field

Насоки за използване на стандарта ISO 18166 в заваръчното производство

Манахил ТОНГОВ

1. Увод

Проектирането на технологичните процеси на заваряване е свързано с решаването на редица важни и сложни въпроси свързани с поведението на заваряваната конструкция както по време на реализиране на технологичния процес така и при нейната експлоатация. Две от задачите, които се налага да бъдат решавани са определянето на температурните цикли в различни точки на заварените съединения и формирането на остатъчните напрежения в конструкцията. Тези две задачи са взаимосвързани като топлинната задача определя деформационната. Стандартът ISO/TS 18166 регламентира основните изисквания по отношение на използването на компютърна техника и програмни пакети за определяне на температурното поле при заваряване и развитието на временните напрежения, в резултат на които се формират остатъчните, в заварената конструкция. Тук разглеждаме основните положения в този стандарт и един пример за да илюстрираме някои от тях. Примерът, който разглеждаме е подфлюсово заваряване на две планки с дебелина 12[mm] и дължина 400[mm]. Едната от планките е със широчина 100[mm], а другата – 200[mm]. Заваряването се извършва двустранно без скосяване на краищата. Химичният състав на основният метал (стомана AISI 4130) е даден в табл.1. Границата на провлачане е 360[MPa], а границата на якостта – 560[MPa]. Параметрите на режима на заваряване са [2]: заваръчен ток – 650[A]; напрежение на дъгата – 32[V]; скорост на заваряване – 31[m/h]; заваръчна междина – 2÷4[mm]. Въглеродният еквивалент на основния метал е $SE_{IIW} = 0.54 \div 0.7$. Това означава, че е необходимо да се определи времето за охлаждане от 800⁰C до 500⁰C и евентуално необходимата температура на подгриване.

Таблица 1. Химичен състав на основния метал [3]

елемент	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
конц.[тег.%]	0.28÷0.3	0.40÷0.6	0.15÷0.3	0.80÷1.	0.15÷0.2	≤0.04	≤0.03
]	3	0	0	1	5	0	5

2. Обхват

Стандартът ISO/TS 18166 регламентира работния процес за изпълнение, валидиране, проверка и документиране на численото симулиране на заваръчни процеси в областта на заварените конструкции (симулационно моделиране на заваръчни процеси и конструкции – СМЗПК). Той е насочен главно към топлинния и силов анализ по метода на крайните елементи (МКЕ) при заваряване чрез стопяване. ISO/TS 18166 обхваща следните аспекти и резултати от СМЗПК, с изключение на симулация на самия процес, наречени компютърна заваръчна механика (КЗМ):

- анализ на топлопренасянето при еднопроходно и многопроходно заваряване;
- топлинно разширяване в резултат на топлопренасянето;
- термични напрежения;
- развитие на нееластични деформации;
- влияние на температурата върху свойствата на материала;
- прогнозиране на разпределението на остатъчните напрежения;
- прогнозиране на заваръчните деформации, изкривяване и разрушаване на конструкцията.

ISO/TS 18166 се отнася до следните физически ефекти без да ги обхваща в дълбочина: физика на топлинния източник (например лазер или заваръчната дъга); физика на заваръчната вана; създаване и поведение на неравновесните твърди фази; разтваряне и отлагане на частиците от втора фаза; влияние на микроструктура на свойствата на материала. Той не се отнася до конкретна област на индустрията. КЗМ може да бъде полезна при решаването на широк кръг задачи. Това дава възможност на индустриалните фирми да определят приложимостта му в съответствие със своите конкретни потребности. Също така няма ориентация към определени алгоритми и програмни продукти. По такъв начин потребителите не са ограничени до използването на МКЕ. Също така не е лимитирано използването на КЗМ в определени области на индустрията. Стандартът посочва само минималните изисквания за числено симулиране на заваръчните процеси.

3. Термини и дефиниции.

- геометричен модел – компютърно представяне на геометрията на анализирания в рамките на симулацията обект;
- физичен модел – пълният набор от физични процеси, които трябва да бъдат представени в математическия модел за описания на симулирания обект с отчитане на целите на симулационния процес;
- модел – математическо представяне на физическа система или процес;
- начални условия – условия, наложени върху изследвания обект, определящи неговото състояние в началото на процеса на пресмятане;
- гранични условия – условията, наложени по пространствената граница между областта, в която се извършва пресмятането и обкръжаващата среда (осигуряват единственост на решението на задачата, формулирана чрез диференциални

уравнения, като при нестационарни задачи влияние оказват и началните условия);

- математически модел – система от уравнения, гранични и начални условия, описващи съществената част на процесите, които е необходимо да бъдат разгледани за решаването на конкретната задача;
- пространствена дискретизация – разделяне на изследваната област на малки геометричните единици, в които диференциалните уравнения от математическия модел могат да бъдат представени с опростени алгебрични уравнения;
- времева дискретизация – разделяне на изследвания период от време на малки времеви интервали, позволяващи опростяване на функциите, скоростта на протичащите процеси и получаването на устойчиво числено решение;
- симулационен модел – комбинация от метод на решаване, геометричен и математически модели и интерактивно представяне на резултатите;
- цифрова симулация – симулация, извършена чрез прилагане на приблизителни математически методи за решаване на математическия модел;
- компютърна заваръчна механика (КЗМ) – подмножество на цифровата симулация и анализ на заваряването;
- метод на крайните елементи (МКЕ) – числен метод за решаване на частни диференциални уравнения;
- проверка на правдоподобността – проверка на резултатите, получени чрез решаване на математическия модел, по отношение на тяхното съответствие с основните физични закони;
- валидация – процес на определяне на степента, до която моделът е точно представяне на физичния проблем от гледна точка на предназначението на модела;
- експеримент за валидиране – експеримент, предназначен специално за валидиране на резултатите от симулацията, като се вземат предвид всички съществени данни и техните отклонения;
- калибриране – процес на коригиране на стойностите на параметрите, управляващи процеса на моделиране с цел подобряване на съответствието му с надеждни експериментални данни;
- верификация (потвърждаване) – демонстрация на правилността на симулационния модел;
- предсказване – оценка на реакцията на физична система, използвайки математически модел;
- топлинния поток – количеството топлинна енергия, което преминава през единица площ за единица време;
- плътност на мощността – количество енергия, погълната или генерирана за единица време в единица обем.

4. Описание на проблема.

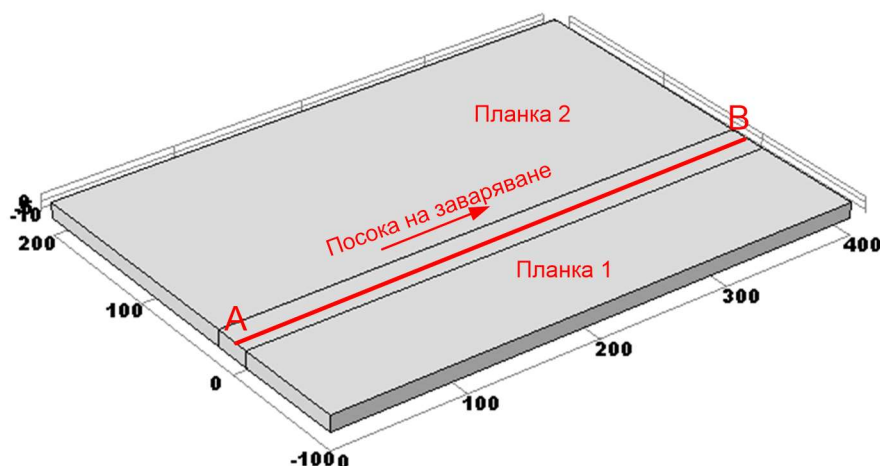
Компютърната заваръчна механика е част от симулационното моделиране и анализ в заваряването, която се осъществява главно чрез използване на метода на крайните елементи. Извършват се нелинейни топлинни и якостно-деформационни анализи, които могат да бъдат последователно или напълно свързани. Енергията, необходима за реализиране на заваръчния процес се прилага чрез математическия модел. Получените температурни полета и цикли (и евентуално микроструктура) се комбинират

с механичните характеристики (модели) на материала и граничните условия за да бъдат предсказани напреженията, деформациите и изкривяванията в заварената конструкция.

Техническата спецификация ISO/TS 18166 разглежда общия проблем на КЗМ, който може да бъде дефиниран като триизмерен модел на твърдо тяло с приложен подвижен топлинен източник. Едновременно се изчисляват температурата, микроструктурата и преместванията, използвайки еласто-виско-пластични модели, базирани на свойствата на материала, променящи се в зависимост температурата в диапазона от стайна температура до температурата на топене. Това не изключва използването на опростени модели, а по-скоро осигурява репери чрез които могат да се оценят направените опростявания. Необходимостта от опростяване се налага главно от компютърни ограничения (размери на обекта, обем на паметта и скорост на пресмятане) и се отнася до много отраслови проблеми, като заваряване на големи дебелини и конструкции в съдове под налягане или корабостроене. Тъй като всяко опростяване на математическия модел, който репрезентира физическата система, може да увеличи несигурността на получаваните чрез симулационно моделиране резултати са необходими повече усилия за проверка и валидиране на модела.

Преди всичко е необходимо точно описание на компонента или цялата конструкция (например геометрия, условия на работа), използваните основни и добавъчни материали, процедурата и последователността на заваряване, както и на условията на закрепване в опорите при базиране и притискане. За дефиниране на граничните условия наличието на документация или снимка на екипировката може да е от съществена полза.

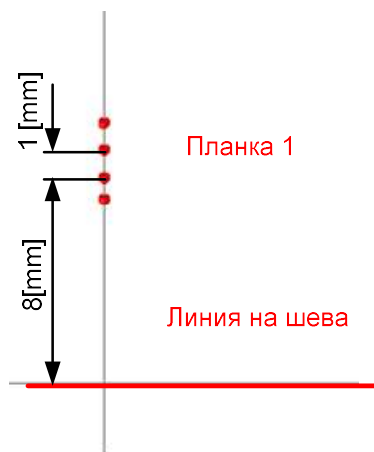
Геометрията на разглеждания пример е показана на фиг.1. Процесът на заваряване стартира от точка А и дъгата се движи по линията на шева до точка В. В качеството на начално условие е зададена температура 20°C . Теплоотвеждането се реализира през всички повърхнини на заваряваните планки, като се отчита конвективен и радиационен топлообмен с околната среда. Температурата на околната среда е 20°C . Топлинният поток в резултат на конвективния топлообмен се изчислява по закона на Нютон, а радиационното теплоотвеждане в съответствие със закона на Стефан-Болцман.



Фиг.1. Схема на процеса

На второ място, но с не по-малка важност е определянето на желаните резултати и респективно целите на симулацията, които произтичат от реалната задача. Това е особено важно, тъй като много реални проблеми все още изискват опростяване за да бъдат решени и анализирани с разумни усилия. Примери в това отношение са изчисляването на остатъчните заваръчни напрежения и изкривявания, размерите на

зоната на термично влияние (ЗТВ) и промените в нея, както и заваръчната процедура и общото количество въведена топлина. Освен това трябва да се посочи крайната цел на симулационния процес, като например: оценка на носещата способност на конструкцията или неин елемент с евентуално отчитане на постулирани или известни несъвършенства в материала или съединението; оптимизиране на процесите след заваряване (например термични) с оглед намаляване на остатъчните деформации и/или напрежения; оптимизация на заваръчните процедури; минимизиране на изкривяванията и натоварванията при заваряване. В разглеждания пример крайната цел на симулационния процес е да се определят температурните цикли на точки, разположени по повърхността на заваряваната планка и на различно разстояние от линията на шева (фиг.2).



Фиг.2. Контролни точки

В зависимост дефинираните цели на симулационния процес се определят: необходимите физични процеси, които следва да бъдат включени; подходящите гранични условия; опростяванията, които могат да бъдат направени; характеристиките на материалите, които следва да бъдат използвани; допълнителните уравнения, които трябва да бъдат включени. В зависимост от желаната сложност на модела, следните примерни физични процеси и ефекти могат да бъдат от значение: топлопренасяне чрез топлопроводимост в твърдото тяло; конвективно и радиационно топлоотвеждане от повърхността; механични характеристики на материалите в еластичната област (модул на еластичност и коефициент на Поасон); зависимост на напреженията от деформациите (например деформационно уякчаване или отвърщане); промени в материалите (например микроструктурни); граница на провлачане; крива на пълзене; топлинно разширяване. За отчитането на тези фактори могат да бъдат първоначално зададени текст, графики, таблици или формули. Истинските гранични и начални условия като първоначалната температура в тялото, температура на околната среда и условията на базиране и притискане трябва да бъдат описани коректно. Опростяванията, които се оказват необходими при определянето на целите на симулационния процес и тези, които се налага да бъдат използвани за неговото реализиране следва да бъдат описани. В разглеждания пример е необходимо да се реши диференциалното уравнение на топлопроводността и да се отчете фазовият преход при промяна на агрегатното състояние.

Въз основа на физичните процеси и ефекти, които следва да се отчитат в конкретния случай трябва да бъде дефиниран математически модел, включващ решаваните уравнения, начални и гранични условия, който да бъде допълнен с модел на топлинния източник. Макар че типичният предвиден метод за решение е метода на крайните елементи методът на решаване трябва да бъде описан, като бъде допълнен с информация, отнасяща се до алгоритъма на решаване и неговата реализация. Това включва конкретни подробности като: тип на използваните крайни елементи (Лагранжови или Ермитови); геометрична дискретизация; времева дискретизация; характеристики на материала; начални и гранични условия.

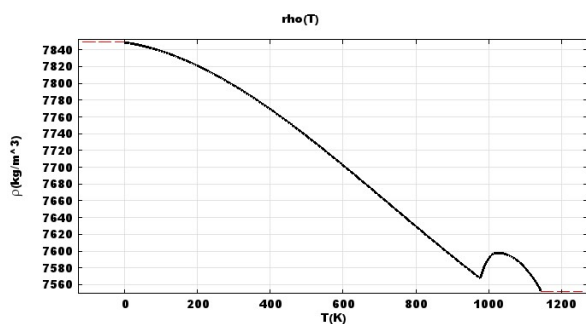
5. Работен процес.

Общите насоки за работа със програмни пакети за решаване на симулационни задачи не са обект на разглежданата техническа спецификация. В нея са дадени само указания за спецификата на решаваните задачи.

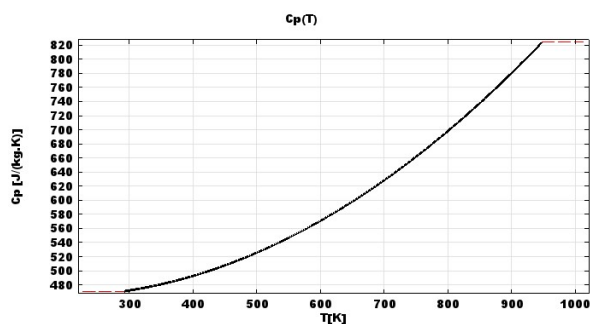
Опростявания и допускания. В различна степен те са част от всеки симулационен модел. Те са насочени към облекчаване на решаването на задачата, но винаги трябва да се отчита доколко провежданият анализ е чувствителен към тях. В разглеждания пример опростяването на геометрията се свежда до това, че не се задава междината между детайлите и по такъв начин не се отчита нейното влияние върху температурното поле. По отношение на физиката на процесите то опростяването се свежда до пренебрегване на влиянието на шлаката и флюса върху топлоотвеждането.

Свойства на материалите. Точността на прогнозата, получена чрез КЗМ се основава отчасти на точността на топлофизичните и термомеханичните свойства на материалите. Неопределеността в свойствата на материала може значително да бъде намалена в зависимост от състоянието на техниката за изпитване. В повечето случаи няма данни за характеристиките на материалите в целият температурен диапазон, който ни интересува. Ето защо предположенията, които са направени за свойствата на материалите трябва да бъдат надлежно документирани. Типичният подход за решаването на този проблем е да се направи анализ на чувствителността на получавания резултат по отношение на тази неопределеност. Тъй като експерименталните данни не могат да бъдат екстраполирани обикновено за температурите, за които няма данни се използват тези за най-близката температура за която са дефинирани. Варирайки тази стойност може да се определи чувствителността на решението по отношение на съответния параметър. Свойствата на материала са зададени като функции, зависещи от температурата (фиг.3÷фиг.5).

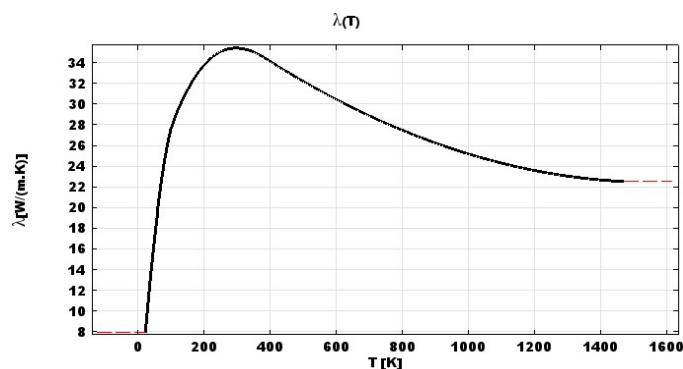
Както се вижда изходните данни не покриват целият интересуваш ни температурен диапазон. В такъв случай трябва да се проведе и анализ на чувствителността на решението по отношение на топлофизичните характеристики. Скрытата топлина на топене е зададена като константа – 250[J/g].



Фиг.3. Плътност на основния метал в зависимост от температурата



Фиг.4. Специфичен топлинен капацитет на основния метал в зависимост от температурата



Фиг.5. Теплопроводност на основния метал в зависимост от температурата

Размерност на модела. Едно от главните решения, които трябва да се направят за реализирането на модела е да се определи неговата размерност. Когато точният триизмерен модел не може да бъде реализиран се правят допускания и опростявания. В повечето случаи се преминава към двуизмерен модел. Едно такова опростяване често може да доведе до бързо получаване на качествени смислени резултати. Двуизмерните модели, към които може да се премине са осисиметричен модел, двуизмерно напрегнато състояние, двуизмерно деформирано състояние и черупкова конструкция. В някои конструкции като ферми и рамки може да се премине и към модели близки до аналитичните (на практика от гледна точка на решаването са едномерни). В разглеждания случай моделът е триизмерен.

Свързаност на задачите. Често се използва последователен подход, при който силовият анализ следва топлинния. Този подход се основава на това, че деформационните процеси не влияят на топлинната задача при заваряване чрез стопяване (пренебрегва се отделянето на енергия в резултат на пластичното формоизменение). Макар и рядко се използва едновременното решаване на системата диференциални уравнения за получаване на точни симулационни резултати. Последователното решаване на топлинната и деформационна задачи е неприложимо при заваряване в твърдо състояние когато контактните явления са свързани с отделянето на топлина (ЕСЗ, заваряване чрез триене, ултразвуково заваряване и др.). Някои програмни продукти позволяват вътрешно разделяне на задачата при което разделянето се реализира в рамките на всяка стъпка по времето. Това дава възможност за всяка от физичните задачи да се използва най-подходящият алгоритъм за решаване. В примера, който разглеждаме се решава единствено топлинна задача.

Заваръчен процес. Минималната информация, която е необходима за описване на заваръчния процес включва метод на заваряване, линейна енергия, скорост на заваряване, траектория на шева и производителност на наваряване.

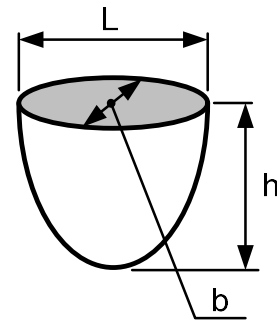
6. Заварена конструкция и заваръчни шевове.

Размерите на конструкцията и/или съединението трябва да бъдат зададени. Те могат да бъдат съпроводени и от снимка. Същото се отнася и до базиращите елементи и притискачите.

За основния материал трябва да бъдат зададени химичният състав и условията на доставка. Аналогични са изискванията и за добавъчния материал, ако има такъв. За

реализиране на пресмятането е необходимо топлофизичните и термомеханичните характеристики на материалите да са зададени като функции от температурата за целият температурен диапазон, който е характерен за процеса на заваряване. Тъй като не се решава флуидна задача в заваръчната вана се допуска изкуствено увеличаване на топлопроводността на течната фаза. Експерименталните данни за термомеханичните характеристики на материала трябва да са получени в условия близки до тези, които са характерни за процеса на заваряване (това обикновено се отнася както до скоростите на нагриване и охлаждане така и до скоростта на деформациите и степента на деформация).

Топлинният източник може да бъде повърхностен, обемен или комбинация от такива. Математическото описание на топлинния източник трябва да се основава на експериментални резултати получени чрез измерване на температурата или размерите на зоната на стопяване и ЗТВ. За определяне на температурното поле се използва класическото уравнение на топлопроводността при подходящи гранични условия. За силовият анализ се използват уравненията на равновесие без да са приложени външни сили, но са зададени ограниченията в резултат на базирането и притискането. Получените резултати трябва да бъдат проверени, валидирани и оформени в съответствие с бланка, предвидена в стандарта. В разглеждания пример се използва обемен топлинен източник с форма на полуелипсоид (фиг.6). Приема се, че топлинната мощност е равномерно разпределена в обема на топлинния източник. Целта е да се имитира наличието на кратер в заваръчната вана, образуван от налягането на дъгата. Размерите на топлинния източник не са известни и могат да бъдат използвани като калибриращи параметри. Друг такъв параметър може да бъде коефициентът на полезно действие на процеса.



Фиг. 6. Схема на топлинния източник

7. Валидация и верификация

За осигуряване на качеството на резултатите от симулацията освен проверката на достоверност на разположение на потребителя са следните основни мерки в зависимост от конкретния случай и цели на симулационния процес. Сравняването с експериментални резултатите трябва да се извършва внимателно, тъй като неопределеностите (както системни така и статистически) са присъщи за всяка измервателна техника и устройство, особено ако измерването не е пряко. За проверка на симулационния модел са достъпни следните варианти: проверка за съгласуваност между физичния модел, математическия модел и метода на решаване; потвърждение чрез използване на различни методи на решаване (числено и аналитично) и сравняване с опростени случаи (например намаляване на размерността, грубо изчисление); количествено определяне на влиянието на промените в дискретизацията (пространствено и времево) върху получавания резултат; доказателство за диапазона на валидността чрез изследване влиянието на параметрите. Както бе посочено калибрирането на параметрите на модела е насочено към повишаване на достоверността на получаваните резултати. То включва определянето на променливите параметри на модела (например параметри на процеса; условия на закрепване; характеристики на материала; параметри, управляващи пресмятането) чрез сравняване на получаваните резултати с експерименталните данни, или алтернативно с изчислени резултати, които не са били използвани за проверка или

валидиране. Калибрирането на топлинния модел може да се извърши, например, като се използват изпитвателни образци или по-малки части от симулирания обект. Това означава, че калибрирането е валидно за разглеждания случай. Тъй като напрегнато – деформираното състояние е критично, то може да се оцени по-точно чрез сравняване на остатъчните напрежения и/или деформации с надеждни експериментални резултати.

Валидирането на резултатите от симулацията се извърши най-малко по един от следните критерии: пълно или частично сравнение на резултатите от изчисленията и получените данни от експеримента за валидиране (например температура, геометрия на заваръчната вана, изкривявания, остатъчни напрежения); демонстрация, че работата на системата според симулационния модел е в съответствие с реалните условия, напр. чрез анализ на чувствителността или изучаване влиянието на параметрите. За експерименталното валидиране е необходимо да са осигурени и съобразени с целите на моделирането подходящ експеримент, методи за измерване и измервателна техника. Експериментът за валидиране трябва да бъде внимателно проектиран и да осигурява възпроизводимост с необходимата точност. Самият експеримент също трябва да бъде симулиран по начин аналогичен на използвания за заварената конструкция. Сравняват се резултатите от тази симулация и проведения реално експеримент.

Често не е възможно и не е необходимо да се изпитва цялата заварена конструкция за да се валидира. Валидацията не е задължително да се извършва за целия симулиран обект и за целия симулационен процес. При използване на изпитни образци за валидиране на топлинния модел е необходимо да се използват същата линейна енергия и мощност. При валидиране на модела за напрегнато – деформираното състояние е необходимо образците да осигурят същата неподатливост както и реалната конструкция.

8. Оформяне на резултатите.

За проследимост целият процес на симулация се документира под формата на отчет. Всеки отделен елемент трябва да бъде посочен явно. Всички незадължителни мерки, които не са използвани трябва да бъдат обосновани. Във всички случаи шаблонът за документиране съдържа най-малко следните елементи:

1. Обект на симулиране, което включва описание на основния обхват на проекта, последователните стъпки на симулацията и основни допускания; очаквания от изследването (качество на резултатите, най-важните необходими резултати).
2. Характеристики на материалите и входни данни: описание на всички материали, използвани в процеса на заваряване (литература, собствени данни включително метод за измерване), отклонения и дименсии на данните; описание на използвания материал, включително химически състав и използвани модели. Трябва да се показват температурно зависими данни за топлофизичните и термомеханичните свойства; топлофизични свойства (коэффициент на топлопроводност, плътност, специфичен топлинен капацитет, енталпия, коэффициент на топлинно разширяване); термомеханични свойства (модул на Юнг, коэффициент на Поасон, параметри на модела на деформационно уякчаване, граница на провлачане, параметри на модел на пластичност).
3. Параметри на процеса: параметри на процеса на заваряване, напр. заваръчен ток, заваръчно напрежение, КПД, скорост на заваряване, заваръчна позиция; описание и параметри на топлинния източник.
4. Мрежа от крайни елементи: няколко изображения на обекта, която трябва да се симулира, и няколко важни изображения на изчислителната мрежа по

отношение на целите на симулацията; брой възли и елементи, размер на елементите на мрежата и интерполираща функция на елементите.

5. Параметри на цифровия модел: вид на стационарното решаване; метод на решаване (например статичен МКЕ); алгоритъм на решаване (например имплицитно, итеративно); стойности на абсолютна или относителна точност за постигане на решението; типична стойност на стъпката по време (критерии за увеличаване на стъпката); начални и гранични условия.
6. Анализ на резултатите. В оценката и показването на резултатите следва да се покажат данни в съответствие с целите на симулацията. Препоръчват се графични и таблични представяния с кратки текстови описания. Трябва да се посочат и данните свързани с верификацията и валидацията на модела.

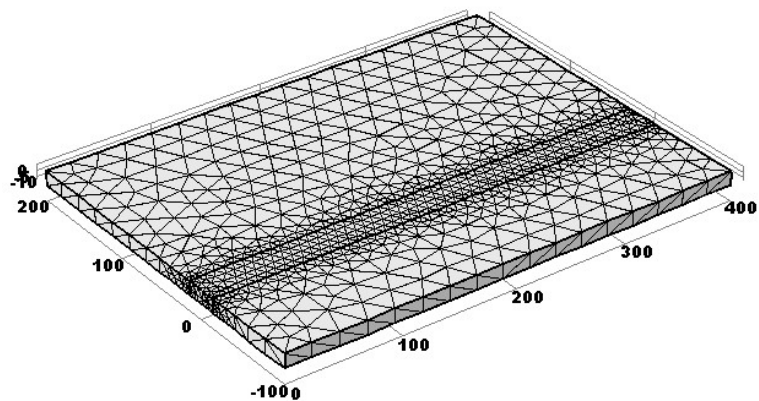
При решаването на задачата са зададени параметрите, посочени в табл.2.

Таблица 2. Параметри, използвани в процеса на симулационно моделиране.

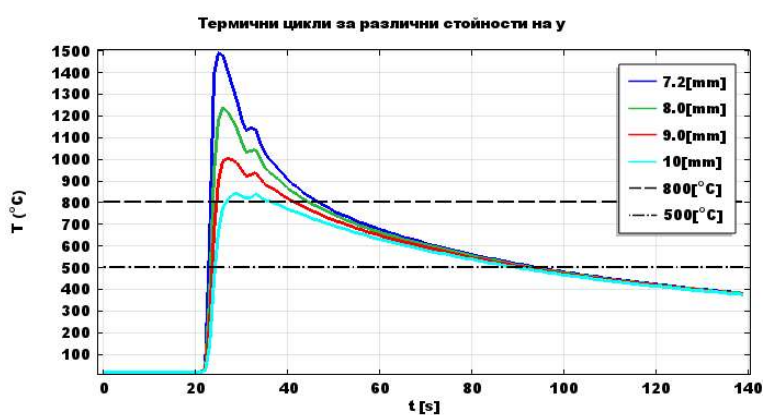
Идентификатор	Стойност или израз	Дименсия	Пояснение
Lplate	400	[mm]	Дължина на планката
Bplate	300	[mm]	Широчина на планката
delta	12	[mm]	Дебелина на планката
Iw	650	[A]	Заваръчен ток
Uw	32	[V]	Напрежение на дъгата
Vw	31	[m/h]	Скорост на заваряване
kpd	0.9		КПД
Pw	$kpd \cdot Iw \cdot Uw$		Ефективна мощност на дъгата
hkr	$0.6 \cdot \text{delta}$		Дълбочина на кратера
bw	$2 \cdot \text{hkr}$		Широчина на шева
Vkr	$4 \cdot (\pi \cdot \text{hkr} \cdot (\text{bw}/2)^2) / 6$		Обем на кратера
Ww	Pw / Vkr		Плътност на мощността
theat	$Lplate / Vw$		Време на нагриване
tcool	$2 \cdot \text{theat}$		Време на охлаждане
tcalc	$\text{theat} + \text{tcool}$		Време на пресмятане
TL	1460	[degC]	Ликвидус температура
TS	1420	[degC]	Солидус температура
LatHeat	250	[J/g]	Скрита топлина на топене

На фиг.7 е показана генерираната мрежа от крайни елементи. Както се вижда тя е по-гъста тъй като в тази зона се очакват по-големи градиенти на температурата. На фиг.8 са показани получените термични цикли в точките, посочени на фиг.2.

Времето за охлаждане от 800 до 500⁰C е 48[s], а средната скорост на охлаждане е 6.26⁰C/s]. Обикновено определянето на времето t8/5 по графика не е удобно и не е точно. Ето защо е препоръчително данните за температурата да бъдат представени във вид на таблица и от там да се определи този параметър (табл.3). В посочената таблица са изпуснати редовете за времето от 50-та до 92-ра секунда. Посочените време на охлаждане и средна скорост на охлаждане се отнасят за $y=7.2$ [s]. По диаграмата за анизотермично разпадане на аустенита за разглежданата стомана (фиг.9) [3] се определя очакваната структура в изследваните точки – бейнит + мартенсит. Друг вариант на за използване на полученото решение и АРА диаграмата на материала е кривите на охлаждане да бъдат наложени върху диаграмата.



Фиг.7. Генерирана мрежа от крайни елементи



Фиг.8. Температурни цикли в контролните точки

Таблица 3. Стойности на температурата в контролните точки.

t	Температура [degC] при			
	y=7.2	y=8.0	y=9.0	y=10
[s]	[mm]			
46	811.483	787.119	755.822	723.943
47	798.779	775.96	746.536	716.456
48	786.756	765.321	737.584	709.137
49	775.321	755.134	728.93	701.972
93	505.868	501.749	496.146	490.079
94	502.07	498.069	492.622	486.719
95	498.337	494.449	489.152	483.408

