

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ КОМПЛЕКСНОЇ МЕТОДИКИ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ

Бернацький А. В., Соколовський М. В., Жук Р. О., Бондарєва В. І.,
Лукашенко В. А., Сіора О. В., Шамсутдінова Н. О.

ВСТУП

У більшості зварювальних процесів енергія вкладається на поверхню заготовки, а потім транспортується всередину за допомогою механізмів теплопровідності¹. При зварюванні лазерним випромінюванням енергія вкладається порівняно глибоко всередині вузької порожнини, створеної падаючим променем. Це важлива особливість, щоб сконцентрувати дуже високу енергію в дуже маленьку площу, ось чому лазерні технології являють собою унікальний метод зварювання матеріалів з мінімальними тепловими спотвореннями і металургійними ушкодженнями заготовки.

Коли щільність потужності збільшується вище певного порогового рівня ($> 10^6$ Вт/см²), передача тепла відбувається за допомогою механізму утворення парогазового капіляру в зоні розплаву, також відомого як «keyhole» через вкрай характерну форму поперечного розрізу зварного з'єднання, яку ми одержуємо (тут і далі – «keyhole»). Даний принцип полягає у наступному: при застосуванні лазерів високої потужності матеріал в «keyhole» випаровується в межах розплавленої області, де високий тиск вироблених парів штовхає розплавлений метал уздовж стінок порожнини. Як тільки таким чином буде створено парогазовий капіляр, він буде діяти майже як чорне тіло, поглинаючи більшу частину лазерної енергії, а також сприяючи в розподілі тепла у глибину матеріалу. Дійсно, випаровування викликано поглинанням лазерного випромінювання або безпосередньо випромінюється з фокусної плями або в процесі його багаторазового відбиття від стінок зварювальної ванни.

¹ Fabbro. R. and Chouf. K, Keyhole modelling during laser welding, J. Appl. Phys. 87, 9. 2000.

Механізм лазерного зварювання, як обробки матеріалу – дуже складний, тому що ряд параметрів, наприклад теплофізичні властивості матеріалу, параметри лазера і швидкість обробки, впливають на це. Тому існує велика кількість математичних моделей, які можуть бути використані для пояснення деяких аспектів фізичної проблеми і можуть підтвердити це експериментами. В даній роботі описано процес розробки та аналізу числової математичної моделі, створеної для розрахунку процесів лазерного зварювання металів та сплавів.

1. Аналіз попередніх робіт та вибір параметрів математичної моделі

В роботі Мордіке та ін. дається огляд деяких моделей, знайдених в літературі. Справді, хороше розуміння поведінки «keyhole», процесу його формування та динаміки дозволяють поліпшити якість зварного з'єднання за рахунок оптимізації параметрів лазерної обробки і процедури зварювання². Серед попередніх робіт, що описують моделі для пояснення процесу лазерного зварювання, можна процитувати цікавий аналітичний підхід Клеменса³, який прийшов до висновку, що фізичні властивості пари, зокрема, теплопровідність і поглинання лазерної радіації, потребує подальшого вивчення.

У цьому контексті Даудені та ін.⁴ розробили модель, яка дає простий опис потоку пари, паралельного вісі «keyhole». Ефект самофокусування декількох відображень, що призводять до збільшення поглинання в нижній частині «keyhole» і її зменшення у верхній частині, було продемонстровано в розрахунках Бека і ін.⁵. З цього був зроблений висновок, що невелика швидкість випаровування достатня для протидії всіх сил, які прагнуть знищити «keyhole».

Амара та ін.⁶ вважають, що «keyhole» спочатку створюється лазерним променем і підтримується багаторазовим феноменом

² Mordike B. L., Schuocker. D. and Kaplan. A. Mathematical models of laser material processing, *Lasers in Engineering*. vol. 3. 1994. С. 3–4.

³ Klemens P.G., Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding, *J. Appl. Phys.* 47, 5. 1976.

⁴ Dowden J. M., Chang W. S., Kapadia P. and Strange C. Dynamics of the vapour flow in the keyhole in penetration welding with a laser medium welding speeds, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 24. 1991.

⁵ Beck M, Berger P. and Hügel H. Modelling of keyhole/Melt interaction in laser deep penetration welding, *ECLAT'92*. Göttingen, Germany. 12-15 October 1992.

⁶ Amara E. H., Bendib A. Modelling of vapour flow in deep penetration laser welding // *Journal of Physics D: Applied Physics*. T. 35. №. 3, 2002. С. 272.

відображень. Перше поглинання Френеля, і це через багаторазових відображень променів на стінці «keyhole», виробляє випаровування частини розплавленого речовини, дозволяючи балансувати між поверхневим натягом, гідростатичним і гідродинамічним тиском, що надаються на область рідини в одній частині, і тиском абляції, викликаним випаровуванням стінки «keyhole» і тиском пари в іншій частині. Цей баланс дозволяє уникнути руйнування порожнини і обструкції «keyhole». Для цієї мети використовується метод трасування променів для відстеження променів від їх входу в «keyhole», поки вони не покинуть його, пройшовши вказану кількість відбиттів на стінці «keyhole» в той час, як певна кількість енергії лазера локально поглинається при кожному відображенні. Координати відображення точки призводять до визначення локальної поверхні, що міститься між парою променів. Згодом ця поверхня використовується⁷ для розрахунку локальної поглиненої інтенсивності і, таким чином, виводиться температура поверхні на шарі Кнудсена. Ця залежність необхідна для розрахунку швидкості викиду пари, яка використовується в якості граничної умови для вирішення рівнянь, які керують потоком пари. Чисельний підхід заснований на дискретизації двовимірного рівняння Нав'є-Стокса використовуючи метод кінцевих елементів.

Ідея використання газового потоку для вимірювання в'язкості рідин, вперше запропонована в роботах^{7,8,9}, отримала подальший розвиток і реалізована в комплексі безконтактних струменевих деформаційних методів і пристроїв контролю в'язкості. У методах на основі коливного процесу взаємодії струменя газу і рідини^{10,11} про в'язкість судять по частоті f_0 зародження хвиль, що мимовільно і періодично формуються та зникають на поверхні поглиблення, утвореного струменем газу з постійною швидкістю w .

Роботи з розробки комплексної методики управління параметрами газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталей та сплавів, виконували, спираючись на дані літературних джерел, а також на дані власних досліджень. Згідно цих даних були визначені три ключові

⁷ Дерягин Б.В., Карасев В.В. Успехи химии. Т. 57. Вып. 7. 1988. С. 1110–1130.

⁸ Дерягин Б.В., Страховский Г.М., Мальшева Д.С. ЖЭТФ. Т. 16. Вып. 2. 1946. С. 171–178.

⁹ Дерягин Б.В., Кусаков М.М., Крым К.С. ЖЭТФ. Т. 16. Вып. 3. 1946. С. 266–279.

¹⁰ Гализдра В.И., Мордасов М.М. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 66. № 6, 2000. С. 37–39.

¹¹ Гализдра В.И., Мордасов М.М. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 71. № 5, 2005. С. 34–38.

складові комплексної методики: параметри, що впливають на газодинамічні процеси при лазерному зварюванні; способи управління цими параметрами; та результати цього впливу.

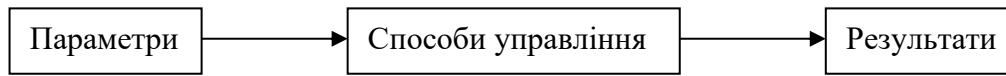


Рис. 1. Блок-схема ключових складових комплексної методики управління параметрами газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталей та сплавів

В якості параметрів газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталей та сплавів були обрані наступні:

1. Тиск газового середовища у різних зонах дії лазерного випромінювання (безпосередньо у парогазовому каналі та області навколо зони зварювання).

2. Швидкість течій газового середовища у різних зонах дії лазерного випромінювання (парогазовому каналі та області навколо зони зварювання).

3. Температура газового середовища у різних зонах дії лазерного випромінювання (парогазовому каналі та області навколо зони зварювання).

Відповідно, при цьому основними способами управління параметрами газодинамічних процесів у наших дослідженнях можуть виступати наступні:

1. зміна виду захисного газу, що забезпечує захист від взаємодії з оточуючим середовищем (наприклад, заміна аргону на гелій або азот чи спеціалізовані суміші);

2. зміна конструкції газозахисного пристрою (конфігурації сопел);

3. зміна режимів подачі газів для утворення ламінаризованого потоку захисного газу замість турбулентного;

4. зміна «куту атаки» захисного газу;

5. зміна витрат захисного газу;

6. зміна з неперервного на імпульсний режим подачі захисного газу;

7. внесення у склад газу додаткової активної компоненти (наприклад, додавання невеликого відсотку кисню), для ініціювання тих чи інших реакцій та взаємодій;

8. зміна режиму генерації лазерного випромінювання з неперервного на імпульсний (з метою впливу на процеси плазмоутворення);

9. комплексні рішення, що містять у собі два або декілька з вищенаведених заходів;

10. тощо.

Результатами впливу на вказані параметри газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталей та сплавів з використанням вищезазначених способів управління, є зміна безлічі показників, до яких належать:

1. Геометричні характеристики зварного з'єднання;
2. Механічні характеристики зварного з'єднання;
3. Структурні особливості зварного з'єднання;
4. Наявність та кількість пор;
5. Наявність та величина тріщин;
6. Наявність та величина розбризкування;
7. тощо.

Одного й того самого необхідного результату можна досягнути, використовуючи різні способи управління тим чи іншим параметром газодинамічних процесів. Головною метою даної роботи загалом є визначення найбільш раціональних шляхів досягнення необхідних (заданих) результатів шляхом моделювання свідомого контролю параметрів газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталей та сплавів.

Для відпрацювання зазначених положень було виконано теоретичний розрахунок теплового поля, що виникає при утворенні проварів у сталі 09Г2С товщиною 10мм.

Моделювання даних процесів – вкрай складний процес через велику кількість динамічних параметрів, що необхідно обирати індивідуально для кожної конфігурації оброблюваних поверхонь. Тому для моделювання теплового поля в цьому випадку було створено дві моделі: теплову та газодинамічну. Обидві моделі були виконані з допомогою комплексу САПР COMSOL Multiphysics.

2. Принцип побудови теплової моделі та її аналіз

Модель теплового обміну була створена з виконанням певних вимог:

1. Урахування температури кипіння, коефіцієнту відбиття та теплоти випаровування.

2. Урахування нелінійності характеристик матеріалу при розрахунку теплового поля.

3. Урахувати нелінійний зв'язок втрат тепла як головної причини встановлення квазірівноваги у зварювальній ванні.

Модель враховує нерівномірний рух в початку і кінці зварювального процесу, Гаусівський розподіл теплового потоку по радіусу лазерної плями та коефіцієнт відбиття, що залежить від температури. При цьому, обрано певні умовності для спрощення розрахунку:

1. Модель не враховує деформацію поверхні твердої та рідкої фаз.

2. Не враховується рух рідкого розплаву та перевідбиття лазерного пучка всередині каналу проплавлення.

3. Момент створення ванни розплаву у вигляді каналу проплавлення та парогазового каналу враховується лише частково.

Було проведено два аналізи завдання теплообміну в сталі 09Г2С при потужності лазерного випромінювання у 2 і 4.4 кВт. Моделі виконані з допомогою фізичного модулю Heat Transfer in Solids (ht). Даний модуль проводить розрахунок теплових процесів при лазерному випромінюванні за моделлю, що базується на законі Стефана-Больцмана, а саме за рівнянням (1):

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_{\text{trans}} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = -\alpha T \frac{dS}{dt} + Q \quad (1)$$

де:

- ρ – щільність [кг / м³]
- C_p – питома теплоємність при постійному напруженні [Дж / (кг*К)]
- T – абсолютна температура [К]
- $\mathbf{u}_{\text{trans}}$ – вектор швидкості поступального руху [м / с]
- \mathbf{q} – тепловий потік за провідністю [Вт / м²]
- \mathbf{q}_r – тепловий потік випромінювання [Вт / м²]
- α – коефіцієнт теплового розширення [1 / К]
- S – другий тензор напруг Піоли-Кірхгофа [Па]
- Q містить додаткові джерела тепла [Вт / м³]

Тепловий слід даного процесу (Q) розраховано з допомогою формули (2), яка враховує Гаусівський розподіл.

Параметри режимів обробки, що використовувались в даних експериментах наведено у таблиці 1.

Було отримано теплову модель конвективного типу з рівномірним розподілом теплової енергії на глибину до 3.42 мм (рис. 2). Гаусівський розподіл енергії успішно дотримується по всій площині поверхні, температура на поверхні перевищує температуру плавлення матеріалу. Провар забезпечується на глибину до 2.8 мм.

Таблиця 1

Характеристики Heat Transfer in Solids

Позначення	Величина	Характеристика
x0	«-48 [mm]»	Координата початку у вісі абсцис
y0	«15 [mm]»	Координата початку у вісі ординат
Laser_power	2000 та 4400[W]	Потужність ЛВ
Rc	0.3	Коефіцієнт відбиття
Width	100 [mm]	Довжина зразка
Height	30[mm]	Ширина зразка
v	1 [m/min]	Швидкість переміщення
Thickness	10 [mm]	Товщина зразка
r_spot	0.42[mm]	Радіус лазерного пучка

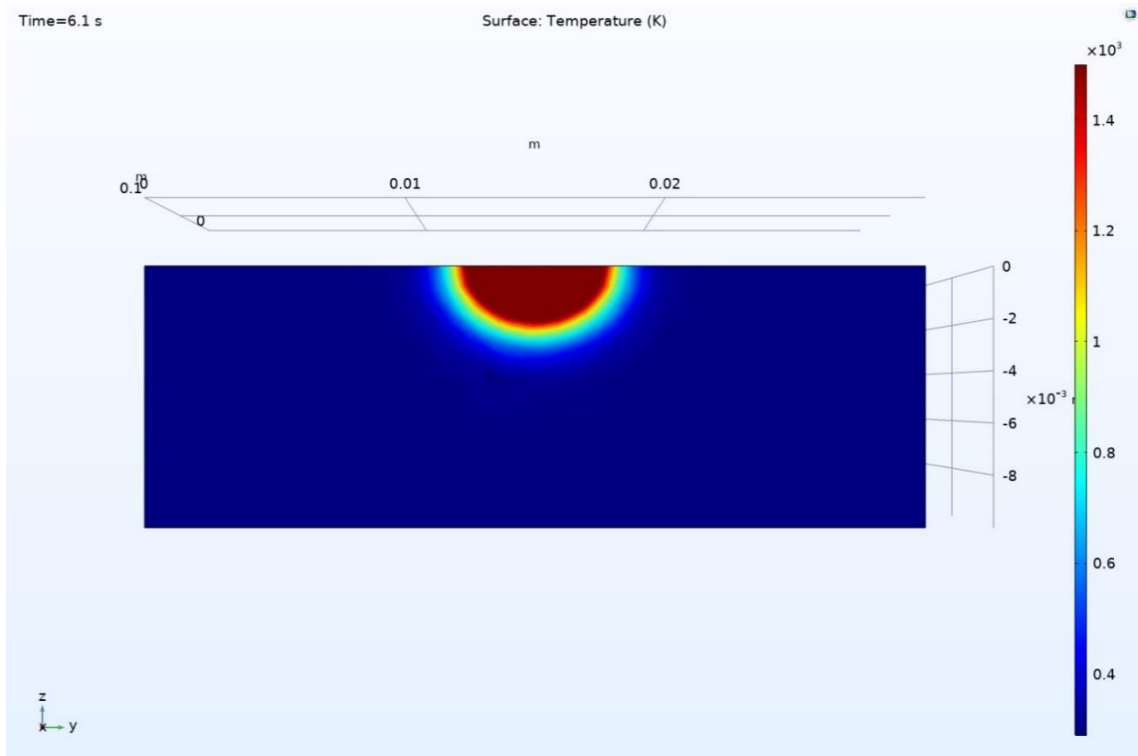


Рис. 2. Схема теплообміну в площині YZ при проварі сталі за допомогою ЛВ з потужністю 2 кВт, момент часу 6.1с (зріз)

При підвищенні потужності лазерного випромінювання до 4.4 кВт, було отримано більш глибокий провар з сталим режимом обробки, який забезпечує утворення рідкої фази матеріалу на глибину до 5.1 мм. В поверхневих шарах матеріалу температура досягає точки випаровування, підкреслюючи необхідність газового захисту.

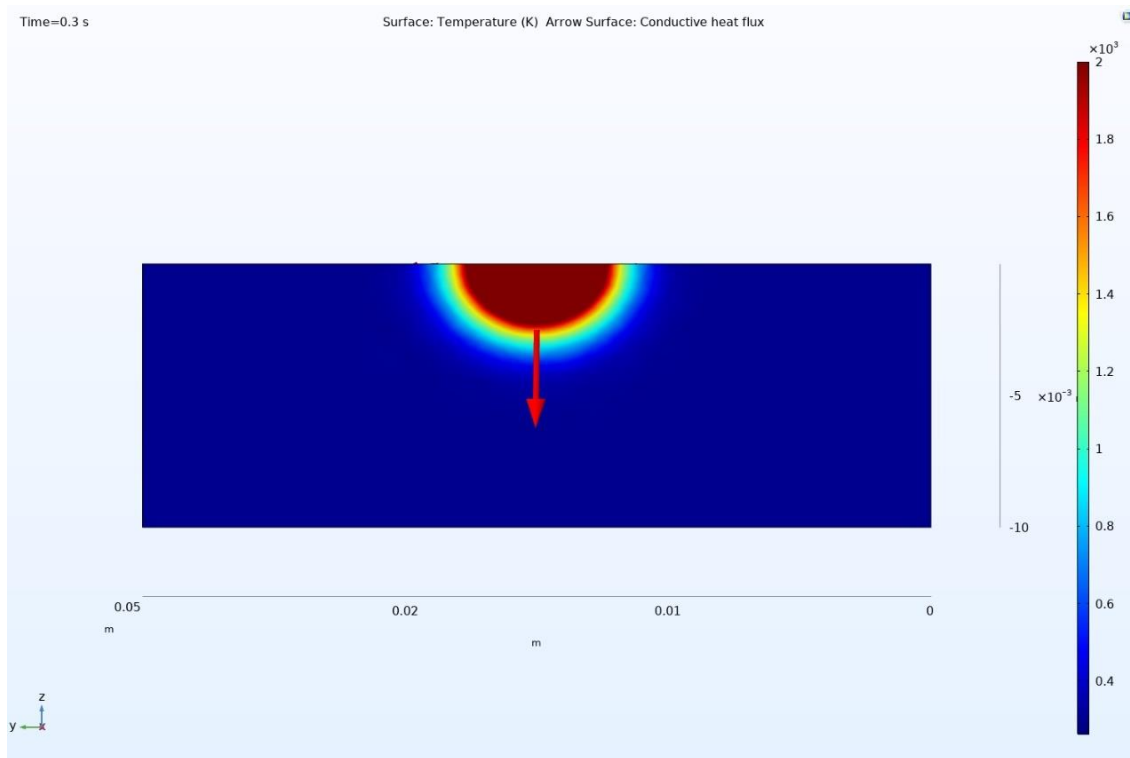


Рис. 3. Схема теплообміну в площині YZ при проварі сталі за допомогою ЛВ з потужністю 4.4 кВт, момент часу 0.3с (зріз)

Для більш ясної візуалізації результатів розрахунків наводиться графік температурного розподілу на Рис. 4. При обраному режимі обробки початковий проплав на глибину в 3.8 мм відбувається під дією лазерного випромінювання, а подальший проплав – від залишкового теплообміну.

Помітно, що температура охолодження знижується до величини у 120°C на протязі 5 секунд, подальше охолодження забезпечується газовим охолодженням та іншими процесами, що проводяться у виробництві, але не враховані в моделюванні.

Біла зона показує, що існує зона, де моментальна температура перевищує 4000°C. Тепловий слід залишає дуже глибоку ванну розплаву, при цьому термічно впливаючи на повну глибину деталі.

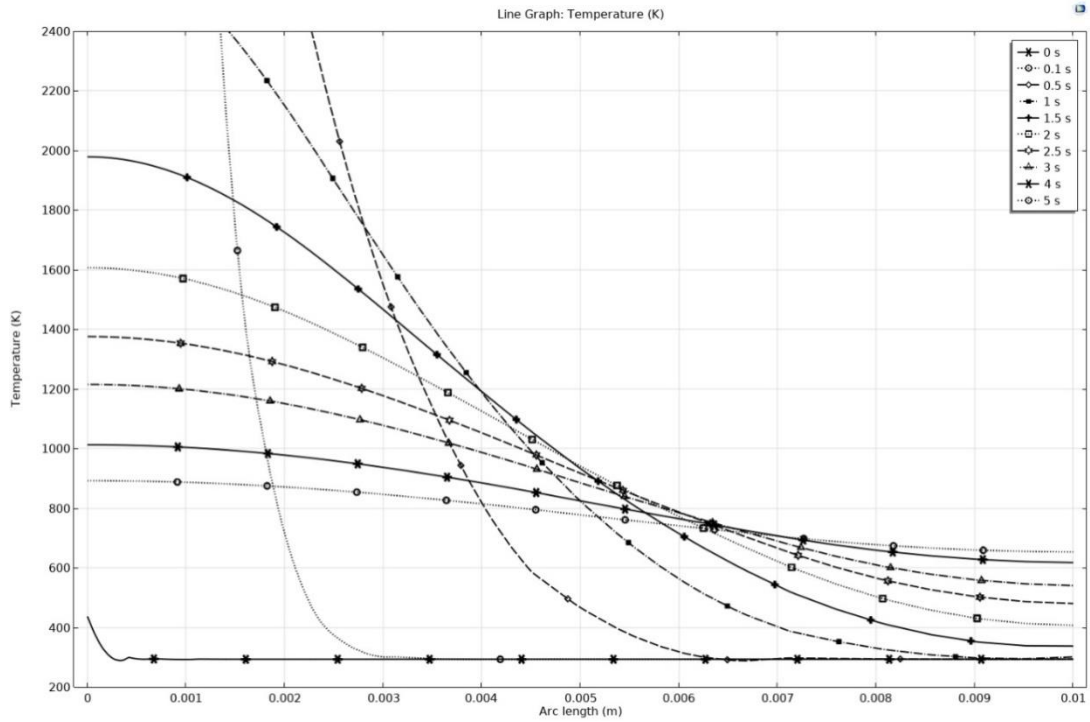


Рис. 4. Графік розподілу температур при проплаві сталі 09Г2С товщиною 10мм за допомогою ЛВ з потужністю 4.4 кВт

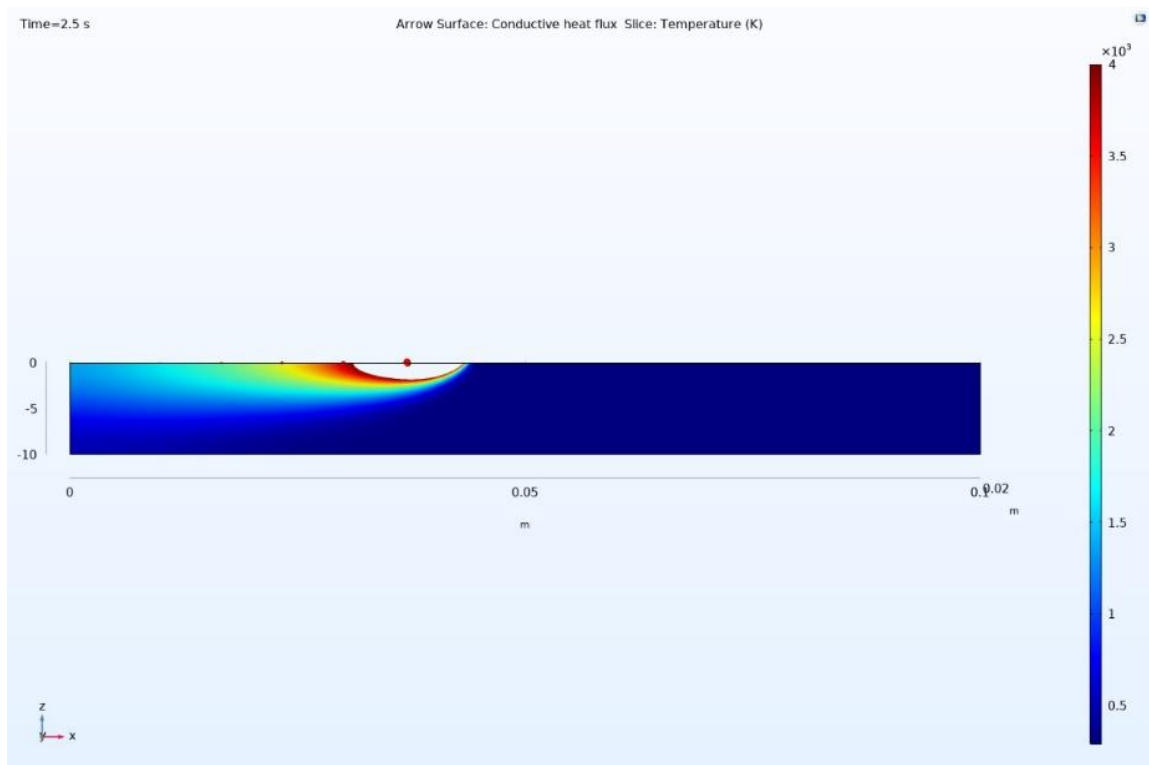


Рис. 5. Схема теплообміну в площині XZ при проварі сталі 09Г2С за допомогою ЛВ з потужністю 4.4 кВт, момент часу 2.5 с

При всьому цьому принципі поведінки початку проварювання обидві моделі показували себе досить однорідно. Для виявлення відмінностей у динаміці теплового процесу, було проведено аналіз ізотермічних контурів обох процесів.

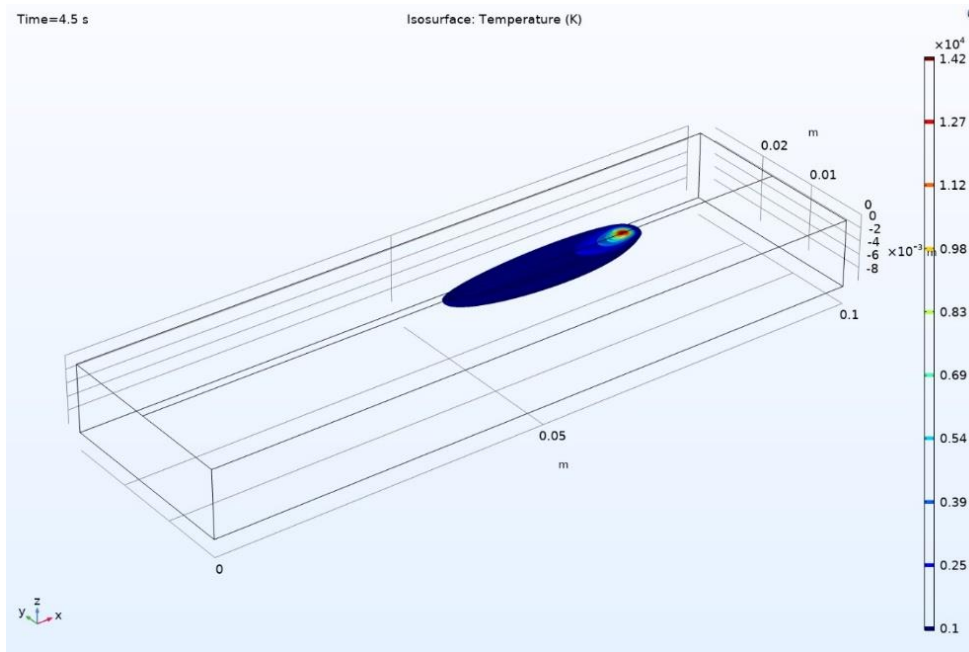


Рис. 6. Ізотермічний контур при проварі сталі 09Г2С за допомогою ЛВ з потужністю 2 кВт, момент часу 4.5 с

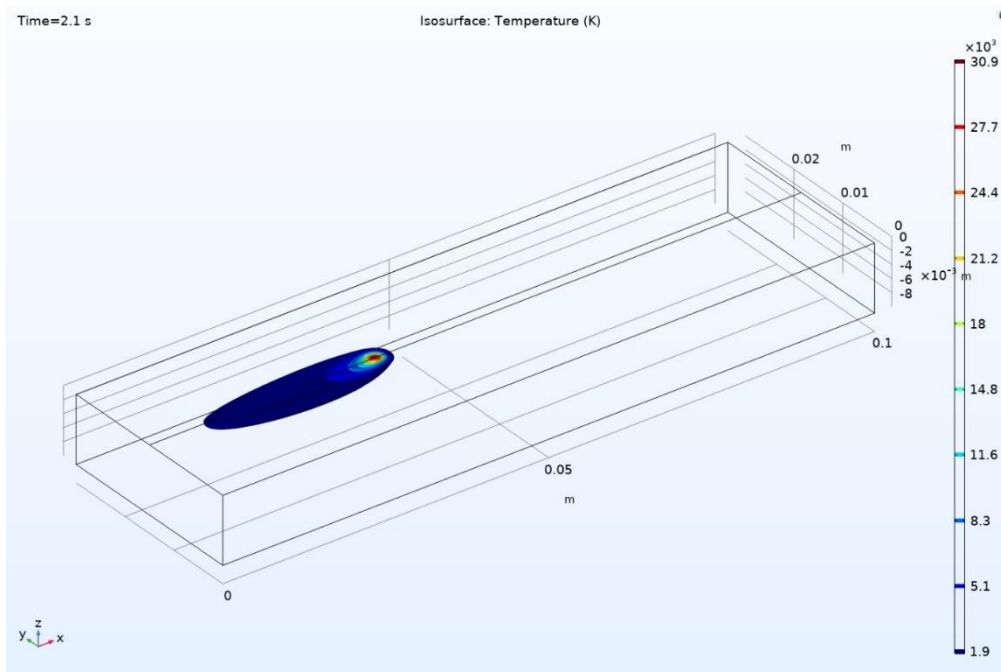


Рис. 7. Ізотермічний контур при проварі сталі 09Г2С за допомогою ЛВ з потужністю 4.4 кВт, момент часу 2.1 с

Обидва процеси утворюють краплевидну ванну розплаву з видовженням у 3.5-5 мм, що вказує на високу початкову швидкість охолодження при відсутності активного лазерного випромінювання, при цьому охолодження в тильній частині активної зони термічного впливу має приблизно однакову швидкість.

Загалом, обидві моделі показують рівномірне, конвективне розповсюдження теплової енергії в області, підверженій лазерному випромінюванню за конвективною схемою. Швидкість охолодження металу вказує на структурні зміни в зоні термічного впливу, а температурний розподіл вказує на часткове випарування поверхневого шару зварювального матеріалу. Очевидно, що через більшу потужність модель з заданою потужністю у 4.4 кВт створює більш широку ванну розплаву з довшим часом охолодження металу.

Можна зробити висновок, що отримані 2Д-форми проварів не будуть співпадати з експериментальними через обрані умовності в розрахунку, що не враховують явище перевідбиття лазерного випромінювання всередині ванни розплаву, а також такого явища, як «лазерне пробиття», які сильно впливають на форму ванни розплаву та шва.

3. Принцип побудови газодинамічної моделі та її аналіз

При розрахунку газодинамічної задачі для виявлення впливу було поставлено такі умови:

1. Урахування температури кипіння, коефіцієнту відбиття та теплоти випаровування.
2. Урахування нелінійності характеристик матеріалу при розрахунку теплового поля.
3. Урахувати нелінійний зв'язок втрат тепла як головної причини встановлення квазірівноваги у зварювальній ванні.

Отримана модель враховує:

1. Різні положення газового захисту відносно руху зварювального процесу.
2. Зміну витрат газу, а також тип захисного газу.
3. Рух рідкої фази матеріалу під дією напору захисного газу.

Модель не враховує як умовності:

1. Деформацію вихідної поверхні матеріалу твердої фази.
2. Динамічність потоку рідкого розплаву, утвореного теплообмінними процесами на поверхні ванни розплаву.
3. Зовнішню складову газопарового потоку.

Для перевірки моделі було проведено серію аналізів газодинамічних процесів у сталі 09Г2С при різних положеннях

газового захисту та з різними швидкостями. Моделі виконані з допомогою фізичних модулів Two-Phase Turbulent Flow, Heat Transfer in Fluids (ht) та Level Set. З огляду попередніх моделей було обрано модель (k-ε) турбулентного потоку за рівняннями Нав'є-Стокса, усередненими за Рейнольдсом (2).

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]. \quad (2)$$

Дані фізичні модулі розраховують вплив газового захисту в різних кутах та з різними швидкостями. Через обмеженість сіткової схеми розрахунку програмного забезпечення, а також через квазістаціонарну природу термодинамічних процесів було прийнято рішення провести двовимірний розрахунок.

При розрахунку газодинамічних процесів для моделювання впливу лазерного випромінювання на розплав було використано термодинамічну модель, що використовує формулу (3):

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = \alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p \right) + \tau : \nabla \mathbf{u} + Q \quad (3),$$

що відрізняється від формули, використаної під час розрахунку теплової моделі врахуванням тензора Коші, який було розділено на дві частини.

Під час експерименту було розглянуто серію ситуацій з різними товщинами та розміщенням сопла подачі захисного газу, а також швидкості подачі газу. Значення цих перемінних наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення перемінних моделювання

Діаметр сопла [мм]	Кут розміщення газового захисту	Швидкості потоку газу [м/с]
1	співвісно вертикально	9.52, 19.04, 25.4
1	25 градусів від осі ЛВ	9.52, 25.4
1	співвісно горизонтально	9.52, 25.4
2	співвісно вертикально	9.52, 19.04, 25.4
2	25 градусів від осі ЛВ	9.52, 25.4
2	співвісно горизонтально	9.52, 25.4
3	співвісно вертикально	9.52, 19.04, 25.4
3	25 градусів від осі ЛВ	9.52, 25.4
3	співвісно горизонтально	9.52, 25.4

Отримані моделі дозволяють розрахувати вплив газового потоку на рідку фазу зварювальної ванни під будь-яким кутом та швидкостями подачі захисного газу до 25–30 м/с. Розрахунок більш швидких потоків захисного газу обмежений через програмні обмеження базових фізичних розрахункових модулів програмного забезпечення, необхідності комплексної перебудови розрахункової сітки, а також необхідності індивідуального вибору параметрів реініціалізації та параметру, що контролює товщину поверхневого шару. Ці ж самі причини ускладнюють розрахунок кутових положень газового захисту.

Даний випадок був розглянутий першим і тому є основою, відносно якої буде розглянуто всі інші ситуації газодинамічної задачі. Рівномірне розповсюдження газу через поверхневий шар металу явно показує відносно ламінарний характер потоку, однак після проходження певної кількості відстані в рідкій фазі відбувається розділення, а потім і зміщення потоку, що вказує на набуття турбулентності і веде за собою зміну форми ванни розплаву. Рис. 9 явно показує фазу зміщення газового потоку, що настає через 0.6–1 с стаціонарності потоку.

При збільшенні швидкості було помічено, що газовий потік набуває турбулентного характеру руху швидше, що проявляється в більш явному розділенні газового потоку, теоретично збільшуючи ванну розплаву. Зміна кута при цьому дестабілізує стартову відносно ламінарну фазу протікання газового захисту, зміщуючи його відносно вісі подачі під тиском розплаву.

У випадку горизонтального зварювання, газовий потік розповсюджується прямолінійно з відсутністю опосередкованого розділення потоку, однак, на відміну від інших конфігурацій, через гравітаційні сили і рівномірний розподіл, всі сили розповсюджуються рівномірно.

З моделей, зображених на Рис. 8-10 можна помітити, що положення газового захисту сильно впливає на потік газу в ванну розплаву, зміщуючи рідку фазу від місця проходження лазерного променя врізнобіч. Уміле використання цього ефекту дає можливість контролювати процеси обробки. Це дає нам можливість досягнути кращого проникнення лазерного випромінювання в ванну розплаву, а звідси – і змінити форму провару. При цьому необхідно зазначити проблематику розрахунку моделей газодинамічних процесів в комплексі САПР COMSOL Multiphysics у випадку, коли захист знаходиться під гострим кутом відносно вертикалі, що явно можна помітити на Рис. 10, яка проблематично розраховує подачу газу під

гострими кутами через трикутну систему побудови розрахункової області.

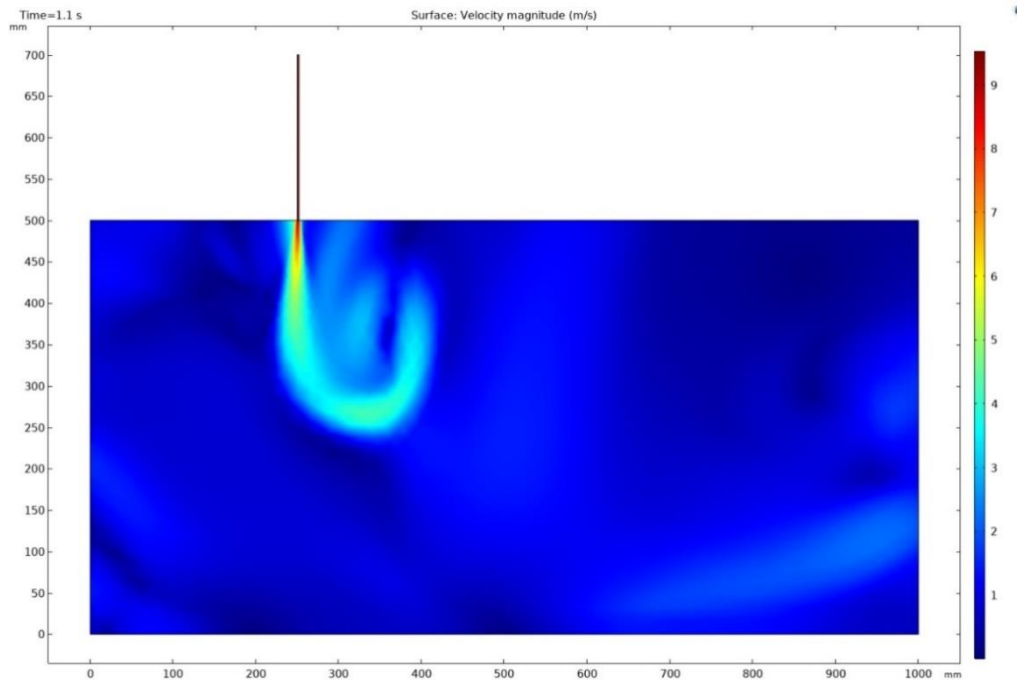


Рис. 8. Схема газодинамічної взаємодії потоку захисного газу і рідкої фази розплаву (співвісне сопло 2 мм, швидкість 9.52 м/с, момент часу 1.1 с)

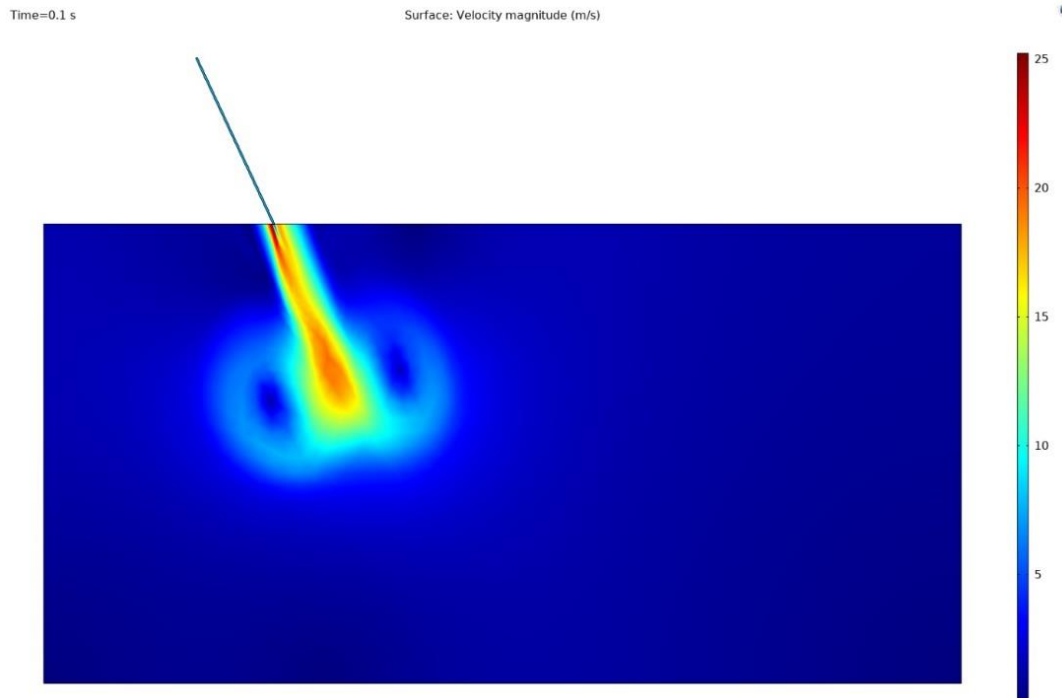


Рис. 9. Схема газодинамічної взаємодії потоку захисного газу і рідкої фази розплаву (сопло 3мм під кутом 25° від вертикалі, швидкість 25.4 м/с, момент часу 0.1 с)

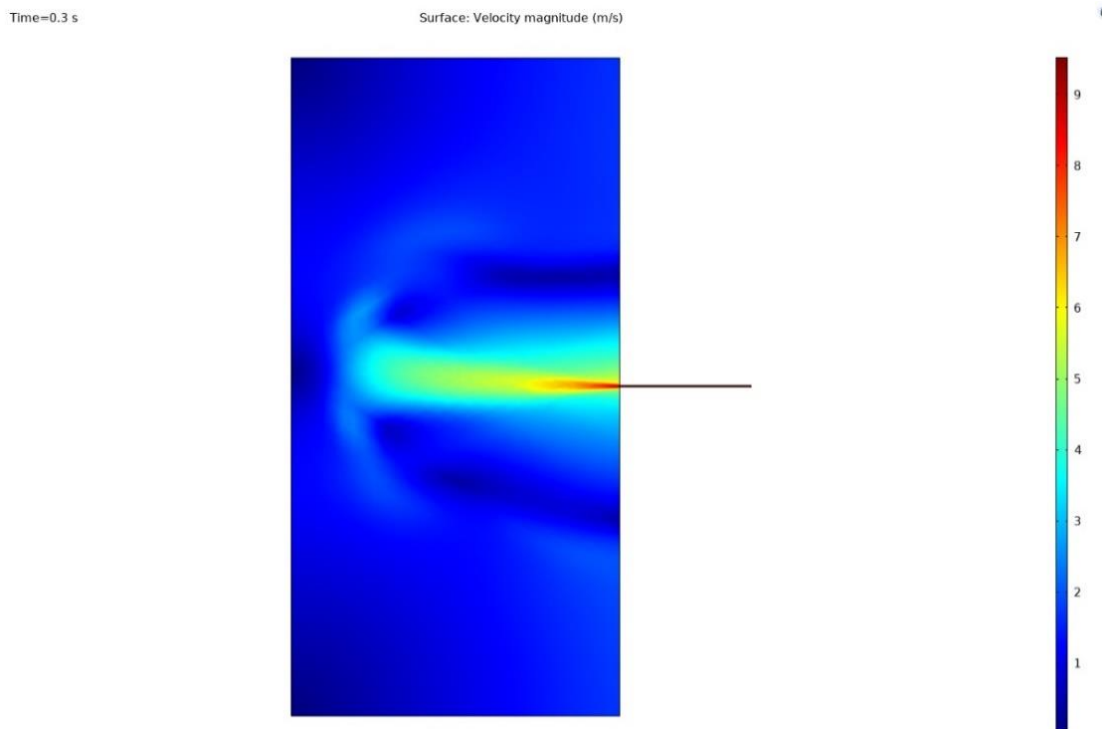


Рис. 10. Схема газодинамічної взаємодії потоку захисного газу і рідкої фази розплаву (сопло 2 мм під кутом 90° від вертикалі, швидкість 9.52 м/с, момент часу 0.3 с)

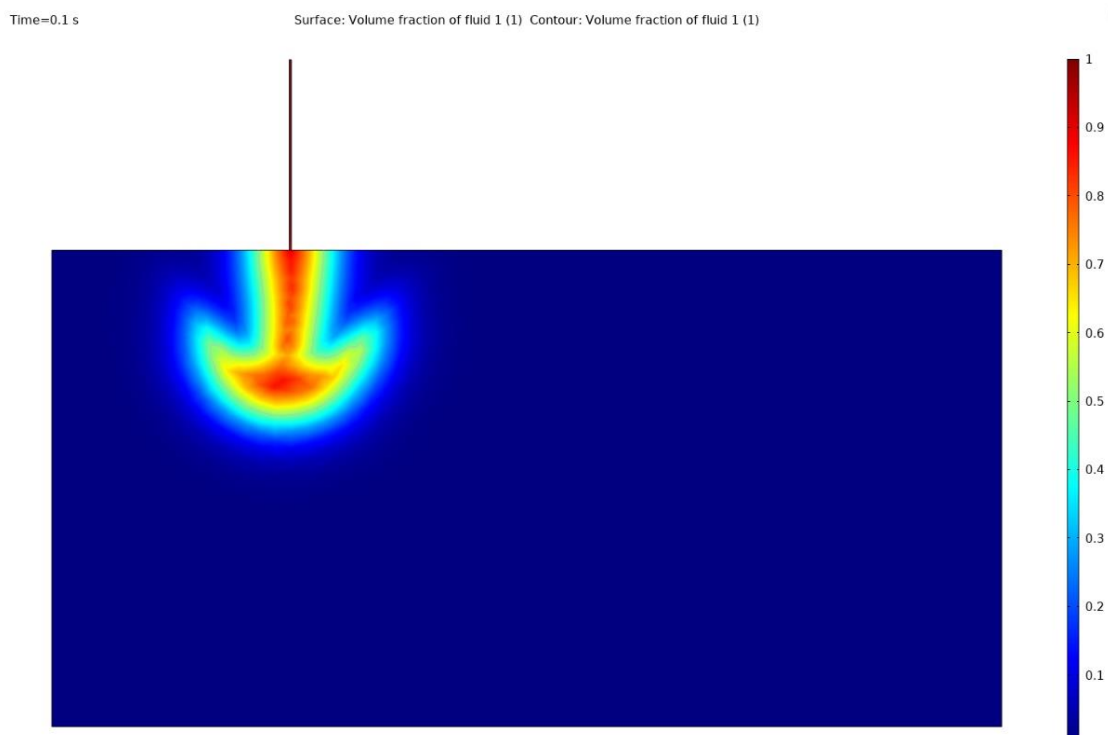


Рис. 11. Схема розповсюдження захисного газу у рідкій фазі розплаву (співвісне сопло 2 мм, швидкість 9.52 м/с, момент часу 0.1 с)

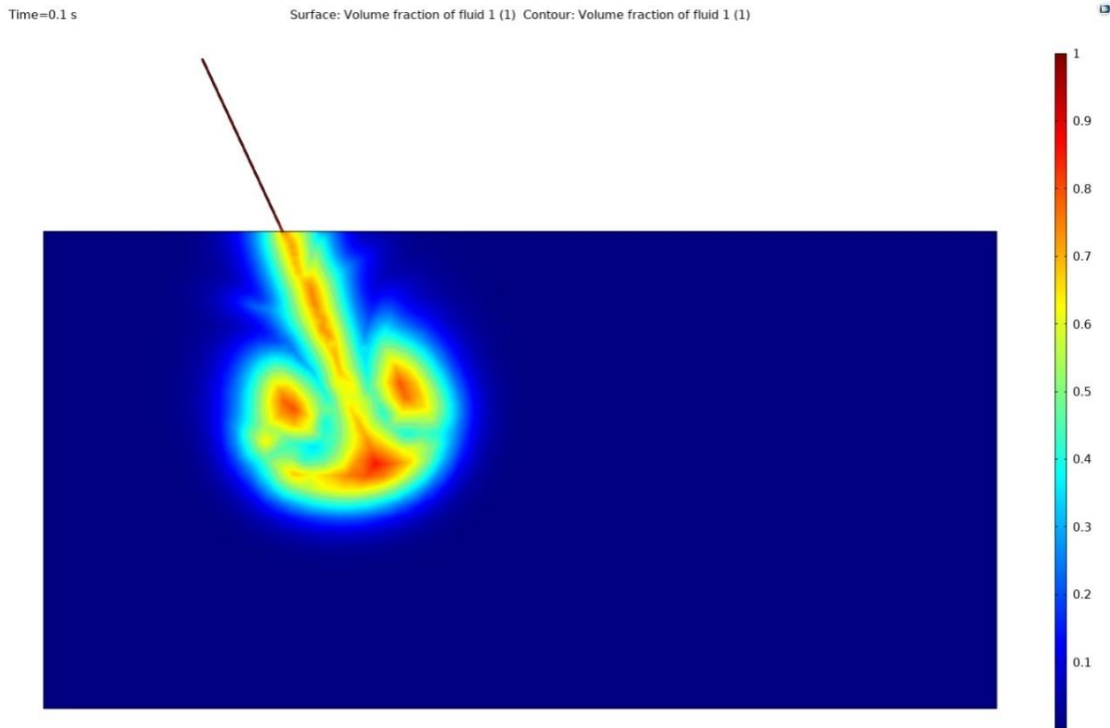


Рис. 12. Схема розповсюдження захисного газу у рідкій фазі розплаву (сопло 3мм під кутом 25° від вертикалі, швидкість 25.4 м/с, момент часу 0.1 с)

З рисунків 11 та 12 було визначено, що турбулентність потоку впливає на форму ванни розплаву. Так, відносно ламінарний потік з Рис. 8 утворює ванну з відносно рівними стінками без заусенцій та зривів, в той час як більш турбулентний потік, наведений на рис. 12, не тільки сприяє створенню несиметричної ванни розплаву, але й спотворює початковий канал, сприяючи утворенню мікротріщин розміру, достатнього для утворення концентраторів напруги.

Збільшення товщини сопла призвело до неочікуваного результату: вкрай раннє розділення потоку з утворенням двох зон розповсюдження захисного газу вказує на вкрай низьку стабільність потоку і сильну дифузію, оскільки основний центральний потік вкрай швидко втрачає свою швидкість.

Можливо, що своє значення має сукупність вищої швидкості обробки та більшого діаметра сопла, оскільки даний розподіл не спостерігався так яскраво в інших умовах.

Time=0.1 s

Surface: Velocity magnitude (m/s)

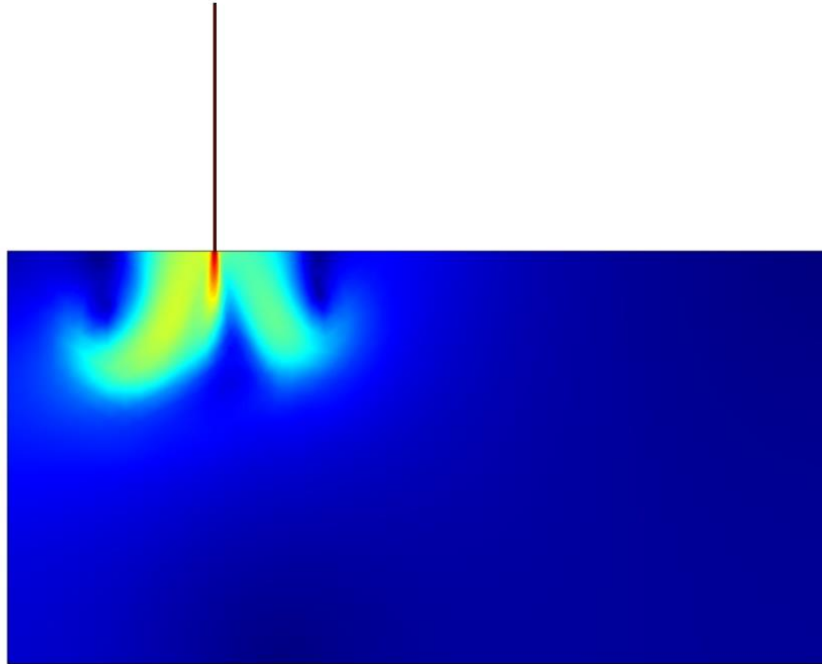


Рис. 13. Схема розповсюдження захисного газу у рідкій фазі розплаву (співвісне сопло 3 мм, швидкість 19.04 м/с, момент часу 0.1 с)

Time=0.1 s

Surface: Velocity magnitude (m/s)

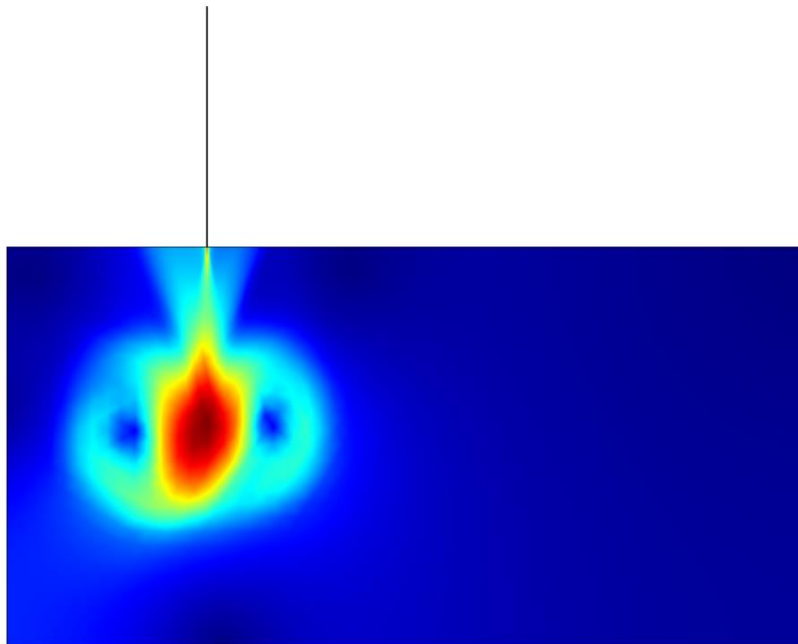


Рис. 14. Схема розповсюдження захисного газу у рідкій фазі розплаву (співвісне сопло 1 мм, швидкість 9.52 м/с, момент часу 0.1 с)

При зменшенні товщини вихідного отвору результат також кардинально змінюється. Тонший потік захисного газу не може встановити такого сильного газового потоку в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу, погіршуючи ефективність виведення побічних продуктів зварювання з зони розплаву.

При цьому, при достатній товщині матеріалу, в ванні розплаву при розділенні потоку утворюються два циркулярні потоки, що сприяють виведенню всіх продуктів зварювального процесу з зони термічного впливу в одне місце. У випадку забезпечення виведення всіх небажаних часток з цієї зони концентрації це може привести до більш якісної структури шва, а в випадку неможливості цього – створити додатковий концентратор напруги.

Важливо зазначити, що через високі швидкості, велику щільність розплавленої сталі, а також сумарний опір рідкої фази металу, захисний газ, що проходить через рідку фазу, має властивість до утворення зони розділення потоку (яскраві приклади наведено на рис. 14-15), яка заповнюється розплавом після проходу лазерного випромінювання, що також впливає на форму зварного шва. Також необхідно помітити, що діаметр та розміщення сопла напряму впливає на швидкість розповсюдження і характер потоку газу.

Через важливість теплообміну в процесі плавлення, було проведено аналіз теплообміну в об'ємі рідкої фази матеріалу, результати якого наведено на рис. 15-16.

В даному випадку можна помітити рівномірний розподіл температури в поверхневому шарі матеріалу з помірним розподілом температури згідно з розділенням потоку захисного газу. З правої сторони зварної ванни при цьому існує тимчасова аномалія, причина якої може полягати в помилці розрахунку програмного забезпечення або відносної слабкості правої складової розділеного потоку відносно лівої. В будь-якому випадку, в силу квазістаціонарної натури завдання для динамічної задачі (проварювання проводиться зліва направо) дана аномалія не повинна негативно вплинути на провар.

У випадку зменшення товщини сопла та швидкості подачі газу температурний розподіл показав те, що сила лазерного випромінювання концентрується у поверхневій зоні лазерного випромінювання, повторюючи схему розподілу газу (рис. 14) у створенні великої зони комбінованого термо-газодинамічного впливу. При цьому, в краях цієї зони помічено утворення двох можливих концентраторів напружень.

Time=0.1 s

Surface: Temperature (K)

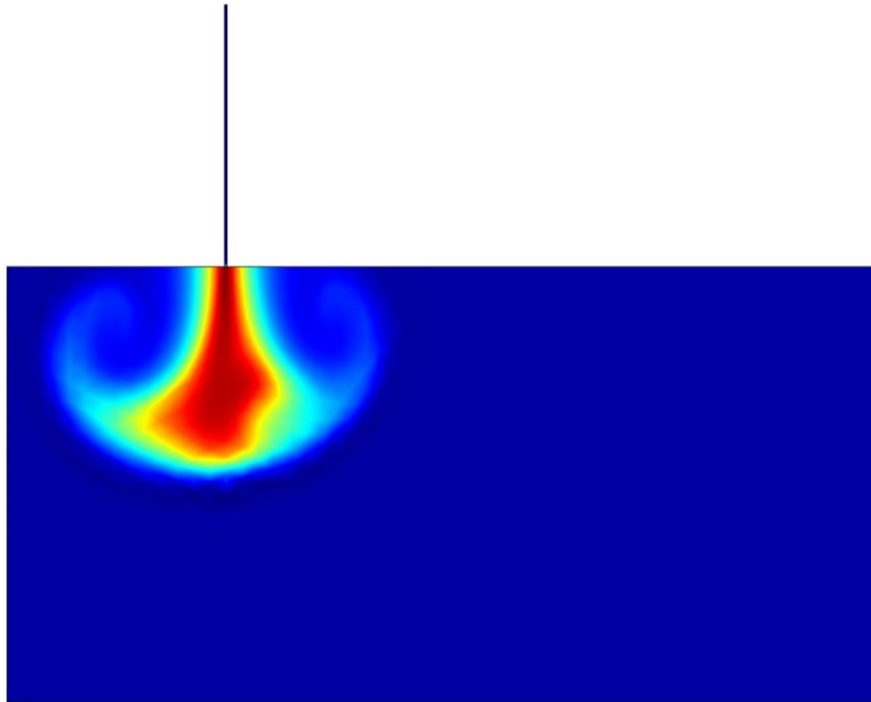


Рис. 15. Схема теплообміну в рідкій фазі розплаву (співвісне сопло 2 мм, швидкість 9.52 м/с, момент часу 0.1 с)

Time=0.1 s

Surface: Temperature (K)

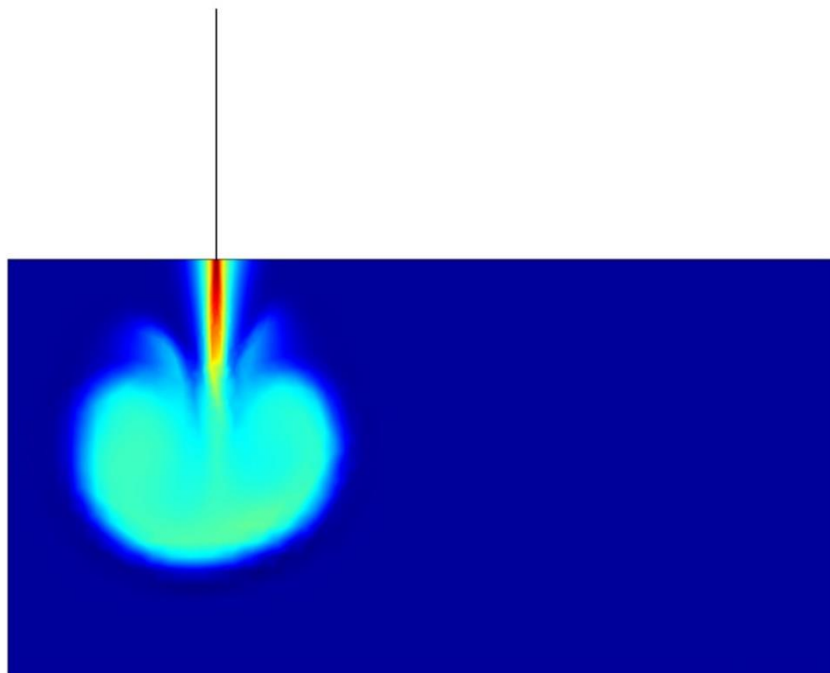


Рис. 16. Схема теплообміну в рідкій фазі розплаву (співвісне сопло 1 мм, швидкість 9.52 м/с, момент часу 0.1 с)

Загалом, границі теплообміну близькі до границь розповсюдження захисного газу, що очікувано при врахуванні газодинамічної схеми і наявності випаруваних часток у ванні розплаву. При цьому на початковому проміжку (0.02-0.04 с) було помічено більш широку ванну розплаву, яка до моменту часу в 0.1-0.14 с звузилась на поверхні та значно розширилась всередині матеріалу внаслідок розділення потоку. При достатній тонкості матеріалу та газовому захисті можливо провести повне проплавлення сталі з відносно невеликим оплавленням країв проплаву.

ВИСНОВКИ

З допомогою комплексу САПР COMSOL Multiphysics було створено дві моделі теплового поля при проварі сталей та сплавів: теплової та газодинамічної. Теплова модель враховує нерівномірний рух в початку і кінці зварювального процесу, Гаусівський розподіл теплового потоку по радіусу лазерної плями, а також коефіцієнт відбиття, що залежить від температури.

Було побудовано тепловою модель конвективного типу з рівномірним розподілом теплової енергії по глибині з утворенням утворюють краплевидну ванну розплаву з видовженням у 3.5-5 мм, що вказує на високу початкову швидкість охолодження при відсутності активного лазерного випромінювання, при цьому охолодження в тильній частині активної зони термічного впливу має приблизно однакову швидкість. Однак, при цьому можна зробити висновок, що отримані 2Д-форми проварів не будуть співпадати з експериментальними через обрані умовності в розрахунку, що не враховують явище перевідбиття лазерного випромінювання всередині ванни розплаву, а також такого явища, як «лазерне пробиття», які сильно впливають на форму ванни розплаву та шва, що необхідно буде передбачити при подальшій роботі над даною моделлю.

Газодинамічна модель була створена для врахування різних положень газозахисту та з різними швидкостями її подачі при зварюванні сталей та сплавів (у експериментальному випадку – сталі 09Г2С). Аналіз даної моделі показав, що границі теплообміну близькі до границь розповсюдження захисного газу, що очікувано при врахуванні газодинамічної схеми і наявності випаруваних часток у ванні розплаву. Необхідно помітити, що діаметр та розміщення сопла напряму впливає на швидкість розповсюдження і характер потоку газу. При цьому важливо зазначити, що через високі швидкості, велику щільність розплавленої сталі, а також сумарний опір рідкої фази металу, захисний газ, що проходить через рідку фазу, було помічено властивість до утворення розділеного потоку, який

заповнюється розплавом після проходу лазерного випромінювання, що також впливає на форму зварного шва.

АНОТАЦІЯ

Механізм лазерного зварювання, як обробки матеріалу дуже складний, тому що ряд параметрів, наприклад теплофізичні властивості матеріалу, параметри лазера і швидкість обробки, впливають на це. При зварюванні лазерним випромінюванням енергія вкладається порівняно глибоко всередині вузької порожнини, створеної падаючим променем. Існує велика кількість математичних моделей, які можуть бути використані для пояснення деяких аспектів фізичної проблеми і можуть підтвердити це експериментами. Моделювання даних процесів – вкрай складний процес через велику кількість динамічних параметрів, що необхідно обирати індивідуально для кожної конфігурації оброблюваних поверхонь. В даній роботі описано процес розробки та аналізу числової математичної моделі, створеної для розрахунку процесів лазерного зварювання металів та сплавів. Після аналізу та визначення важливих параметрів моделювання теплового поля у випадку зварювання сталі 09Г2С було створено дві моделі: теплову модель конвективного типу з рівномірним розподілом теплової енергії; а також газодинамічну модель для врахування різних положеннях та з різними швидкостями газового захисту при зварюванні сталей та сплавів. Дані моделі виявились загалом задовільними, з широким потенціалом використання і можливостями до покращення та уточнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fabbro. R. and Chouf. K, Keyhole modelling during laser welding, J. Appl. Phys. 87, 9. 2000.
2. Mordike B. L., Schuocker. D. and Kaplan. A. Mathematical models of laser material processing, Lasers in Engineering. vol. 3. 1994. С. 3–4.
3. Klemens P.G., Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding, J. Appl. Phys. 47, 5. 1976.
4. Dowden J. M., Chang W. S., Kapadia P. and Strange C. Dynamics of the vapour flow in the keyhole in penetration welding with a laser medium welding speeds, J. Phys. D: Appl. Phys. 24. 1991.
5. Beck M, Berger P. and Hügel H. Modelling of keyhole/Melt interaction in laser deep penetration welding, ECLAT'92. Göttingen, Germany. 12-15 October 1992.
6. Amara E. H., Bendib A. Modelling of vapour flow in deep penetration laser welding //Journal of Physics D: Applied Physics. T. 35. №. 3, 2002. С. 272.

7. Дерягин Б.В., Карасев В.В. Успехи химии. Т. 57. Вып. 7. 1988. С. 1110–1130.
8. Дерягин Б.В., Страховский Г.М., Малышева Д.С. ЖЭТФ. Т. 16. Вып. 2. 1946. С. 171–178.
9. Дерягин Б.В., Кусаков М.М., Крым К.С. ЖЭТФ. Т. 16. Вып. 3. 1946. С. 266–279.
10. Гализдра В.И., Мордасов М.М. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 66. № 6, 2000. С. 37–39.
11. Гализдра В.И., Мордасов М.М. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 71. № 5, 2005. С. 34–38.

Information about the authors:

Bernatskyi Artemii Volodymyrovych,

Candidate of Technical Sciences,

Senior Researcher at the Department of Specialized High-Voltage
Technique and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine

11, Kazymyr Malevych str., Kyiv, 03150, Ukraine

Sokolovskiy Mykola Volodymyrovych,

Postgraduate Student at the Department of Specialized High-Voltage
Technique and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine

11, Kazymyr Malevych str., Kyiv, 03150, Ukraine

Zhuk Ruslan Olehovych,

Senior Lecturer at the Department of Laser Systems
and Advanced Technologies

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

37, Peremohy Avenue, Kyiv, 03100, Ukraine

Bondarieva Valentyna Ivanivna,

Specialist at the Department of Specialized High-Voltage Technique
and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine

11, Kazymyr Malevych str., Kyiv, 03150, Ukraine

Lukashenko Volodymyr Andriiovych,
Candidate of Technical Sciences,
Researcher at the Department of Specialized High-Voltage Technique
and Laser Welding
E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine
11, Kazymyr Malevych str., Kyiv, 03150, Ukraine

Siora Oleksandr Vasylovych,
Researcher at the Department of Specialized High-Voltage Technique
and Laser Welding
E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine
11, Kazymyr Malevych str., Kyiv, 03150, Ukraine