



الرقم الترتيبي :

الرقم التسلسلي :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح - ورقلة -

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

أطروحة دكتوراه الطور الثالث -LMD-

تخصص فيزياء الإشعاع والمادة

إعداد الطالبة: قريدة صليحة

الموضوع:

دراسة سلوك المائع والسلوك الحراري عند لحام قطعتين معدنيتين بالليزر

Etude du comportement fluide et thermique lors du soudage de deux pièces métalliques au laser

نوقشت يوم : 20 / 12 / 2023

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

| | | | |
|--------|--------------------------------------|-----------------|-------------------|
| رئيسا | جامعة ورقلة | أستاذ | غرياني رشيد |
| مقرر | جامعة ورقلة | أستاذ | خلفاوي فتحي |
| مناقشا | جامعة ورقلة | أستاذ | بن مبروك لزهري |
| مناقشا | مركز البحث للطاقات المتجددة - غرداية | مدير بحث | قدور عبد المجيد |
| مناقشا | جامعة ورقلة | أستاذ محاضر 'أ' | عاشوري عبد الرحيم |
| مناقشا | المدرسة العليا للإساتذة - ورقلة | أستاذ محاضر 'أ' | سويقات عبد القادر |
| مدعوة | جامعة ورقلة | أستاذ محاضر 'ب' | لمقدم سومية |

السنة الجامعية: 2023 / 2024

الإهداء

طريق البحث العلمي كان شاقًا وصعبًا.. ولكن هناك من كانوا عونًا لي

أهدي لهم هذه الشهادة؛ إلى:

أمِّي الغالية حفظك الله لنا، وجعلك ذخراً لنا، وقلبًا نابضًا نستلهم منه

الطاقة الإيجابية؛ بفضل دعواتك ورضائك الدائم ما كنت نجحت.

أبي الذي كان دائمًا في بالي وفي قلبي، رحمة الله عليه وأسكنه فسيح

جنانه، الذي دعمني ماديا ومعنويا.

زوجي لدعمه وتشجيعه وأولادي ياسين وكوثر وعبد الرحمان حفظهم

الله، وإلى كل أفراد عائلتي وإخوتي، وإلى كل أساتذتي وأصدقائي

وزملائي.

صليحة قريدة

التشكرات

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات والصلاة والسلام على رسوله الكريم ومن تبعه بإحسان إلى يوم الدين. الشكر لربي العباد العلي القدير شكرا جزيلاً طيباً مباركاً فيه الذي أنارني بالعلم، وأكرمني بالتقوى، وأنعم علي بالعافية، وأنار طريقي ووفقني وأعانني في إتمام هذه الرسالة وتقديمها على الشكل الذي هي عليه اليوم، له الحمد و الشكر وهو الرحمان المستعان.

أتقدم بجزيل الشكر والتقدير والعرفان للأستاذ الدكتور فتحي خلفاوي، أستاذ تعليم عال في جامعة قاصدي مرياح ورقلة، لمساعدته ولنصائحه وتفهمه طوال هذا العمل. أحيي روحه النقدية وتشجيعه الذي مكّني من إكمال هذا العمل.

كما أتقدم بالامتنان والعرفان للأستاذة الكرام أعضاء لجنة المناقشة الموقرة. أود أن أشكر بحرارة السيد رشيد غرياني، أستاذ تعليم عال في جامعة قاصدي مرياح ورقلة، على شرف ترؤس لجنة تحكيم رسالتي، وأتقدم له بكل امتناني.

إنه لمن دواعي سروري أن أحظى بالسيد بن مبروك لزهري، أستاذ تعليم عال، والسيد عاشوري عبد الرحيم، أستاذ محاضر، كلاهما في جامعة قاصدي مرياح ورقلة على تشريفهما لي بقبول دراسة هذا العمل.

كما أتوجه بالشكر الجزيل للسيد قدور عبد المجيد، مدير بحث بمركز البحث للطاقت المتجددة غرداية، على منحي شرف دراسة هذه الأطروحة.

كما أتقدم بالشكر الجزيل للسيد سويقات عبد القادر، الأستاذ المحاضر في المدرسة العليا للأستاذة بورقلة على منحي شرف دراسة هذه الأطروحة.

كما أتقدم بشكر الجزيل للأستاذة لمقدم سومية أستاذة محاضرة بجامعة قاصدي مرياح ورقلة على مساعدتها في إنجاز هذا العمل، وقبول دعوة حضورها مناقشة الرسالة ولجنة التحكيم.

أود أن أشكر جزيل الشكر الأستاذ كمال عبد الرزاق من جامعة المنستير - تونس على مساعدته وشرحه لبعض جوانب موضوع البحث في فترة متقدمة من إنجاز الرسالة وترحيبه لنا.

أتقدم بجزيل الشكر إلى العاملين في مركز الحساب المكثف بجامعة قاصدي مرياح ورقلة على تعاونهم في إنجاز الحساب العددي.

تم تنفيذ هذا العمل في مخبر الإشعاع والبلازما والفيزياء السطوح (LRPPS)، كلية الرياضيات وعلوم المادة، جامعة قاصدي مرياح ورقلة. أود أن أشكر جميع العاملين في هذا المخبر.

كما أشكر جميع أساتذتي في جامعة قاصدي مرياح ورقلة و زملائي؛ أرسل إليهم كل تعبير الاحترام والتقدير.

أود أن أشكر جميع أفراد عائلتي، وخاصة أولئك الذين كانوا حاضرين في الأوقات المهمة، وخاصة والدتي العزيزة. شكرا للجميع.

الفهرس

| | |
|-----------|--------------------|
| i..... | الإهداء..... |
| ii..... | التشكرات..... |
| iii..... | الفهرس..... |
| vi..... | قائمة الأشكال..... |
| viii..... | قائمة الجداول..... |
| ix..... | الترميز..... |
| 1..... | مقدمة عامة..... |

الفصل I: مفاهيم عامة وأساسيات دراسة اللحام بالليزر.

| | |
|----------|---|
| 5 | 1- مقدمة..... |
| 5 | 2- معلومات عامة عناللحام..... |
| 5 | 3- أصناف عمليات اللحام..... |
| 7 | 1-3 لحام القوس الكهربائي GTAW..... |
| 7 | 2-3 لحام البلازما..... |
| 8 | 4- تعريف الليزر..... |
| 9 | 1-4- الانقلاب السكاني والضحض الضوئي..... |
| 9 | 2-4- طريقة الإرسال..... |
| 9 | 5- طريقة لحام الليزر..... |
| 9 | 1-5- نظرة عامة..... |
| 10 | 2-5- اللحام بالليزر CO ₂ |
| 10 | 3-5- اللحام بالليزر Nd :YAG..... |
| 11 | 4-5- أجهزة اللحام بالليزر Nd:YAG..... |
| 13 | 5-5- مبدأ اللحام بالليزر..... |
| 14 | 6-5- متغيرات اللحام بالليزر..... |
| 14 | 1-6-5- البعد البؤري و موضع نقطة التركيز..... |
| 15 | 2-6-5- الاستطاعة و السرعة..... |
| 16 | 3-6-5- غاز الحماية..... |
| 16 | 6- دراسة بعض الظواهر عملية اللحام الليزر..... |

| | |
|----|--|
| 16 | 1-6- نقل الطاقة..... |
| 17 | 2-6- تشكل بركة اللحام أو الذوبان..... |
| 18 | 3-6- تشكل القناة البخارية أو التجويف البخاري (capillaire)..... |
| 18 | 4-6- تشكل البلازما..... |
| 19 | 5-6- الدراسة المجهرية لوصلة اللحام مشترك..... |
| 20 | 7- المائع..... |
| 20 | 1-7- تعريف المائع..... |
| 20 | 2-7- معادلات الحفظ..... |
| 21 | 8- المصدر الحراري..... |
| 21 | 1-8- المصدر الحراري السطحي..... |
| 23 | 2-8- المصدر الحراري الحجمي..... |
| 25 | 9- المعدن المستعمل..... |
| 27 | 1-9- سلبيات و ايجابيات سبائك المغنيزيوم..... |
| 27 | 2-9- سبائك المغنيزيوم في الصناعة..... |

الفصل II: النمذجة العددية للحام سبيكة المغنيزيوم AZ91

| | |
|----|--|
| 29 | 1- مقدمة..... |
| 29 | 2- تعريف الظاهرة الفيزيائية..... |
| 30 | 3- بعض القوى الناتجة..... |
| 30 | 1-3- قوة الطفؤ..... |
| 30 | 2-3- توتر السطح وحمل مارانجوني..... |
| 31 | 4- نمذجة المصدر الحراري..... |
| 33 | 5- النموذج الرياضي..... |
| 33 | 1-5- معادلة انحفاظ الطاقة..... |
| 33 | 2-5- معادلة الاستمرارية..... |
| 33 | 3-5- معادلة انحفاظ كمية الحركة..... |
| 34 | 4-5- دراسة وحساب تغير الطور..... |
| 34 | 6- النموذج العددي..... |
| 35 | 1-6- تجزئة مجال المحاكاة..... |
| 36 | 2-6- مكاملة المعادلات في المجالات العنصرية..... |
| 37 | 1-2-6- في الحالة الصلبة..... |
| 41 | 2-2-6- في الحالة السائلة..... |
| 45 | 7- الشروط الابتدائية و الشروط الحدية..... |
| 45 | 1-7- الشروط الابتدائية و الحدية بالنسبة لسرعة..... |

| | |
|----|---|
| 48 | 2-7- الشروط الابتدائية و الحدية بالنسبة لدرجة الحرارة |
| 49 | 3-7- الشروط الابتدائية و الحدية بالنسبة لتغير الطور..... |
| 49 | 8- برنامج الحساب..... |

الفصل III: النتائج و المناقشة

| | |
|----|--|
| 51 | 1- المقدمة..... |
| 51 | 2- شروط العملية..... |
| 51 | 1-2- المعدن المستعمل..... |
| 51 | 1-1-2- الخصائص الفيزيائية لسبائك خليط المغنيزيوم..... |
| 52 | 2-1-2- الخصائص الميكانيكية لسبائك خليط المغنيزيوم..... |
| 53 | 2-2- تحديد متغيرات نمذجة عملية اللحام بالليزر..... |
| 54 | 3- النتائج والمناقشات..... |
| 54 | 1-3- تغير درجة الحرارة بدلالة الإحداثيات r , z , θ والزمن t لقيم مختلفة ل P و V_w |
| 54 | 1-1-3- تأثير سرعة اللحام V_w |
| 56 | 2-1-3- تأثير استطاعة الليزر..... |
| 58 | 2-3- تغيير المركبتين U و W لسرعة المائع بدلالة r و z |
| 58 | 1-2-3- تأثير سرعة اللحام V_w |
| 59 | 2-2-3- تأثير استطاعة الليزر..... |
| 60 | 3-3- المقارنة بين سرعة المائع و سرعة اللحام..... |
| 60 | 1-3-3- تأثير سرعة اللحام V_w |
| 60 | 2-3-3- تأثير استطاعة الليزر..... |
| 61 | 4-3- تحديد مقطع طولي لبركة اللحام..... |
| 61 | 1-4-3- تأثير استطاعة الليزر..... |
| 62 | 2-4-3- تأثير سرعة اللحام V_w |
| 63 | 5-3- مقارنة بين الدراسة العددية و التجريبية..... |
| 64 | 4- خلاصة..... |
| 65 | الخلاصة العامة و الآفاق المستقبلية..... |
| 67 | الملاحق..... |
| 76 | المراجع..... |

قائمة الأشكال

| الصفحة | العنوان | الرقم |
|--------|---|-------|
| 6 | تصنيف لعمليات اللحام [20] | 1 |
| 6 | المصادر الحرارية و كثافات الطاقات [21] | 2 |
| 7 | تركيب لحام القوس الكهربائي GTAW [24]. | 3 |
| 8 | تركيب عملية لحام البلازما [26]. | 4 |
| 10 | رسم تخطيطي لمبدأ عمل الليزر YAG المستمر [29]. | 5 |
| 11 | آلات أحادية الكتلة للحام الليزر YAG [30]. | 6 |
| 11 | آلة لحام الليزر بألياف بصرية بخمسة محاور [30]. | 7 |
| 12 | آلة لحام الليزر الأوتوماتيكية ثلاثية الأبعاد [31]. | 8 |
| 12 | آلة لحام إصلاح القالب [32]. | 9 |
| 13 | آلة لحام ألياف الليزر المحولة [33]. | 10 |
| 14 | مبدأ عملية اللحام بالليزر YAG [34]. | 11 |
| 14 | متغيرات عملية اللحام بالليزر [20]. | 12 |
| 15 | a تركيز شعاع الليزر. b تأثير موضع النقطة المحورية مع التركيز على شكل عمق اللحام [35]. | 13 |
| 15 | تأثير سرعة اللحام على عمق الاختراق وعرض محور اللحام [14] | 14 |
| 16 | تأثير استطاعة الليزر على عمق الاختراق وعرض محور اللحام. [14] | 15 |
| 17 | نمط نقل الطاقة a: الناقلية و b التجويف البخاري [38]. | 16 |
| 17 | مراحل تشكل بركة الذوبان [19]. | 17 |
| 18 | تشكل القناة البخارية [40]. | 18 |
| 19 | تشكل البلازما على سطح بركة الذوبان [40]. | 19 |
| 19 | مجهريه مناطق اللحام المشترك [40] | 20 |
| 22 | نماذج المصدر الحراري السطح. [40] | 21 |
| 24 | نماذج المصدر الحجمي. [13] | 22 |
| 26 | تصنيفات سبائك المغنيزيوم. | 23 |
| 30 | رسم تخطيطي لعملية اللحام بالليزر وشبكة الحساب العددي. | 24 |
| 31 | تأثير تدرج توتر السطح أو تأثير مارانجوني [57]. | 25 |
| 32 | توزيع كثافة تدفق الطاقة على السطح [46]. | 26 |
| 35 | الحجم العنصري في الفضاء. | 27 |

| | | |
|----|---|----|
| 50 | مخطط النمذجة لدمج المعادلات التفاضلية المقترنة [59]. | 28 |
| 54 | تغيرات درجة الحرارة T بدلالة $r, z, P = 1500 \text{ W}$ وقيم مختلفة ل V_w . | 29 |
| 55 | تغيرات درجة الحرارة T بدلالة $r, z, P = 700 \text{ W}$ وقيم مختلفة ل V_w . | 30 |
| 56 | الفرق في درجة حرارة على نفس المسافة من عرض و عمق اللحم. | 31 |
| 57 | تغيرات درجة الحرارة T بدلالة r و z وقيم مختلفة من P . | 32 |
| 58 | تغيرات في درجة الحرارة بدلالة z و $r, \theta = 90^\circ, P = 1000 \text{ W}, V_w = 10 \text{ m/min}$ و $t = 67.68 \text{ ms}$. | 33 |
| 59 | تغيرات السرعة القطرية U والمحورية W المكونة لسرعة المائع بدلالة r, z وقيم مختلفة ل V_w . | 34 |
| 59 | تغيرات السرعة القطرية U والمحورية W المكونة لسرعة المائع بدلالة r, z وقيم مختلفة من P . | 35 |
| 61 | مقطع طولي لحوض اللحم من أجل 1000 W و $P = 1500 \text{ W}$ و $V_w = 10 \text{ m/min}$. | 36 |
| 62 | مقطع طولي لبركة اللحم من أجل $P = 2000 \text{ W}$ وقيم مختلفة ل V_w . | 37 |
| 62 | عرض و عمق اختراق محور اللحم بدلالة سرعة اللحم واستطاعة الليزر $P = 1000 \text{ W}$. | 38 |
| 68 | معدن المغنيزيوم المستخرج [65]. | 39 |
| 71 | شبكة مجال الحساب على ثلاثة أبعاد. | 40 |

قائمة الجداول

| الصفحة | العنوان | الرقم |
|--------|--|-------|
| 21 | المتغيرات Φ , Γ و S لمعادلات الحفظ. | 1 |
| 27 | مقارنة الكتلة الحجمية والناقلية الحرارية لسبائك المغنيزيوم و الألمنيوم. | 2 |
| 51 | التركيب الكيميائي المتوسط ل AZ91 [13] | 3 |
| 52 | الخصائص الفيزيائية ل AZ91 [40]. | 4 |
| 53 | الخصائص الميكانيكية ل AZ91 [40] | 5 |
| 60 | يمثل النسبة بين سرعة اللحام وسرعة المائع بدلالة تغير V_w . | 6 |
| 60 | يمثل النسبة بين سرعة اللحام وسرعة المائع بدلالة تغير P . | 7 |
| 64 | النسبتين للقيم التجريبية والرقمية لعرض و عمق بركة اللحام لقيم مختلفة من V_w و $P=800 W, 1000W, 1500 W$. | 8 |
| 68 | أهم سبائك المغنيزيوم [66]. | 9 |
| 69 | تأثير العناصر المضافة على سبائك المغنيزيوم [66]. | 10 |

جدول الترميز

| | | | |
|-----------------|---|--------------------------------|---|
| C_p | السعة الحرارية النوعية ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) | V_w | سرعة اللحام (m s^{-1}). |
| C_{p_s} | الحرارة النوعية للمرحلة الصلبة. | d | العمق الأقصى (m). |
| C_{p_l} | الحرارة النوعية للمرحلة السائلة. | K | نفاذية (m^2) |
| ρ | الكتلة الحجمية (kg m^{-3}). | P | استطاعة شعاع الليزر (W) |
| ρ_s | الكتلة الحجمية للمرحلة الصلبة . | U, V, W | مركبات السرعة (ms^{-1}) |
| ρ_l | الكتلة الحجمية للمرحلة السائلة . | Q | مصدر الحراري الحجمي (Wm^{-3}). |
| λ | الناقلية الحرارية ($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$) . | Q_s | مصدر الحراري السطحي (Wm^{-2}). |
| λ_s | الناقلية الحرارية للمرحلة الصلبة. | r, θ, z | الإحداثيات الاسطوانية (m). |
| λ_l | الناقلية الحرارية للمرحلة السائلة. | ΔH_{fus} | الحرارة الكامنة للانصهار (J kg^{-1}) |
| T | درجة الحرارة (K). | μ | اللزوجة الديناميكية (kg m) |
| T_a | درجة الحرارة المحيطة. | δ | معامل التوتر السطحي (N m^{-1}). |
| T_s | درجة حرارة الصلب. | k | معامل النفاذية (m^2) . |
| T_l | درجة حرارة السائل. | β | معامل التمدد الحراري (k^{-1}). |
| T_v | درجة حرارة الغليان. | g | تسريع الجاذبية (ms^{-2}) . |
| T_f | درجة حرارة الانصهار. | t | الزمن (s) . |
| R | قطر مصدر الحراري (mm). | λ_0 | الطول الموجي (m) . |
| L_x, L_y, L_z | أبعاد قطعة العمل (mm). | h | ثابت بلانك ($\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$) . |
| E | طاقة الموضوع (J/mm). | $d\varphi$ | التدفق الحراري (Wm^{-2}) . |
| E_p | طاقة الفوتون (J). | i, j, k | متغيرات في الفضاء . |
| ϑ | التوتر (Hz). | $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ | خطوات الأبعاد (m) . |
| e | سمك قطعة العمل (mm). | Δt | خطوة الزمن (s). |
| γ | معامل التوتر السطحي ($\text{N K}^{-1} \text{m}^{-1}$). | | |

المقدمة العامة

المقدمة العامة

تعرف عملية اللحام تحسينات سريعة من خلال البحث المستمر. من أجل إصلاح القطع أو لحامها أو قطعها، مع التطور التكنولوجي، زادت الحاجة إلى لحام عالي الجودة و إلى خطوط لحام موثقة في الصناعات المتقدمة كالصناعات النفطية والسيارات والطيران وشبكات الأنابيب والجسور المعدنية و الصناعات الأخرى [1، 2، 3، 4]. ان خيار أي جزء من خط اللحام في مثل هذه الصناعات يعني قدرًا هائلًا من الخسائر في الأرواح و الأموال. لذلك، تعتبر خطوط اللحام بالليزر مهمة جدًا في هذه المجالات. وهذا نتيجة خصائصه المميزة مثل السرعة العالية، انخفاض استهلاك الطاقة، الدقة العالية في إصابة الهدف و التمدد الحراري الصغير. وهي خصائص تتعلق بمهندسة منطقة الانصهار أو بركة اللحام واستقرار عملية اللحام وجودتها. تتضمن عملية اللحام بالليزر العديد من الظواهر الفيزيائية التي تؤثر أيضًا بشكل كبير على جودة اللحام، بما في ذلك تكوين أو تشكل التجويف البخاري [5، 6]، ظهور بلازما داخل المادة وفوق سطح المعدن [7]، وكذلك ظهور ضغط رجعي داخل تجويف البخاري وفي بركة اللحام [8]، وتغير المجال الحراري وتدفق سرعة المائع في منطقة الانصهار نتيجة تفاعل الليزر مع المادة.

تدرس ظاهرة اللحام هذه إما عن طريق التجربة أو المحاكاة. وعند صعوبة توفر المعدات و المواد التجريبية المستخدمة في التجربة في المخابر أو ورشات العمل، يمكن التطرق إلى المحاكاة العددية كمساعد للتجربة. في الآونة الأخيرة يفضل العلم و الباحثون الطرق العددية حتى في وجود المعدات التجريبية. هذا لأن المحاكاة العددية لظاهرة اللحام بالليزر عملية ذات أهمية كبيرة لتمكنها من إلقاء نظرة داخل قطعة العمل، على نطاقات زمنية قصيرة جدًا. وبالتالي السماح بتحليل العمليات التي لا يمكن ملاحظتها أو بالكاد يمكن مراعاتها بالسوائل التجريبية.

نظرًا لتعقيد عمليات الليزر، حيث تقترن مجموعة متنوعة من الظواهر الفيزيائية المختلفة مع بعضها البعض، فإن هذه النماذج الوحيدة القادرة على تحليل ديناميكيات العملية في التجويف البخاري أو بركة اللحام. ومن أهم الظواهر تأثيرًا هي تتبع توزيع الحرارة و سرعة المائع وكذلك حجم منطقة الذوبان بمرور الزمن.

يستند نموذج المحاكاة على الحل العددي للمعادلات التفاضلية، وهي: معادلة الحفاظ الطاقة لحساب توزيع درجة الحرارة؛ التحدي الأكبر في هذا السياق هو إدماج الحرارة الكامنة مع ارتفاع درجات الحرارة أثناء الانتقال من التصلب إلى الذوبان، وكذلك حل معادلات نافير ستوكس لحساب سرعة المائع و تكيفه مع الشروط الحدية و النهائية. وعلاوة على ذلك، فإن اختيار لغة البرمجة مهم جدًا في بناء النماذج العددية. تعد لغة Fortran من أهم اللغات لأنها لغة عامة و عالمية لكثير من البرمجيات.

الهدف العديد من الأعمال المنشورة هو دراسة السلوك الحراري، و تحديد شكل بركة اللحام، و معرفة الظواهر المختلفة التي تنطوي عليها عملية اللحام. يختلف جوهر هذه الأعمال في تطوير برامج الحساب و مطابقة نتائجها مع الدراسات التجريبية؛ على سبيل المثال نذكر:

H. T. Lee et al. [9]: تم إنجاز عملية اللحام التجريبية و العددية لتأثير حقل درجة الحرارة على حساسية المنطقة النشطة حرارياً لسبيكة 609 (الفولاذ المقاوم للصدأ الذي يحتوي على نسبة أعلى من الكروم و محتوى أقل من كربون). من خلال طريقتين للحام: باستخدام شعاع الليزر وقوس غاز التنغستين، حيث تم إجراء المحاكاة باستعمال برنامج ANSYS software وفي ثلاثة أبعاد و قاعدة بيانات JMatPro. من خلال مقارنة عملية اللحام، وجد أن هنالك اتفاق كبيراً بين التجريبي و العددي؛ يتميز اللحام بالليزر بتركيز حرارة أكبر وأكثر سرعة و معدل تبريد أسرع. وتكون المنطقة النشطة حرارياً أضيق، و نتيجة لذلك، يكون حجم و عرض المنطقة النشطة حرارياً أصغر من منطقة اللحام بالقوس التنغستين.

A. Mahrle et al. [10]: في هذه الدراسة، تم إيجاد تأثير بعض القوي في منطقة الانصهار مثل توتر السطح وقوة الاحتكاك و قوة الطفؤ على مجال درجة الحرارة و توزيع السرعة تدفق المائع في بركة اللحام و تنبؤ بحجم و اتساع بركة اللحام. و تم تطوير المحاكاة العددية بثلاثة أبعاد و تم حل مختلف المعادلات النظام بطريقة SOR التكرارية و مقارنتها بالتجربة.

Y. Hu et al. [11]: درسوا اللحام بالليزر للفولاذ المقاوم لصدأ والنيكل، حيث اهتم بتوزيع العناصر وانتقال الحرارة في منطقة الانصهار من خلال نموذج ثلاثي الأبعاد في الحالتين:

الحالة الأولى: تأثير تدفق المائع يعتبر مهم، أي أن معادلات الحفاظ على كمية الحركة و الكتلة لم يتم حلها. الحالة الثانية: قوة مارانجوني وقوة الطفؤ مدروسة. من تحليل درجة الحرارة في بركة اللحام. خلص إلى أن نقل الكتلة يكون أسرع عند السطح العلوي لأن الحمل الحراري قوي في بداية تكوين الذوبان أو بركة اللحام، ويتناقص بمرور الزمن أثناء اللحام بالليزر.

X. He et al. [12]: درسوا انتقال الحرارة و تدفق المائع للفولاذ المقاوم للصدأ 309 من خلال اللحام الليزر النقطي في بركة اللحام. و درس أيضاً حجم المنطقة اللينة -وهي خليط من المرحلتين الصلبة و السائلة- و أبعاد البركة، و مقارنة نسبة التبريد و تدرج درجة الحرارة في اللحام الليزر النقطي مع لحام قوس التنغستين الخطي و النقطي. افتراض في نموده انتقال الحرارة و تدفق المائع في ثلاثة أبعاد و اعتماداً على معادلات حفظ الكتلة و الطاقة و كمية الحركة. خلص إلى أن تدفق المائع يرجع أساساً إلى التوتر السطحي وقوة الطفؤ. يعد نقل الحرارة عن طريق التوصيل مهمًا أيضاً عندما تكون سرعة المائع منخفضة في بداية الذوبان و أثناء تصلب بركة اللحام. وجد في اللحام بالليزر النقطي أن معدل التبريد، و تدرج درجة الحرارة و معدل التصلب في بركة الذوبان أكبر بكثير من تلك الموجودة في اللحام قوسي تنغستين GTA الخطية والنقطة.

K. Abderrazak et al. [13]: تم تطوير نموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام البرنامج FLUENT لمحاكاة تشكيل البركة المنصهرة و التجويف البخاري أثناء التفاعل بين الليزر المستمر والمغنيزيوم AZ91. من خلال إيجاد توزيع الحرارة على سبيكة المغنيزيوم. في هذه المحاكاة يتم حل معادلات كمية الحركة والاستمرارية والطاقة، يتم إدراج المصدر الحرارة الحجمي لطاقة الليزر في

معادلة الطاقة. توصل أن شكل وحجم البركة المنصهرة في قطعة العمل يتأثران بمتغيرات اللحام مثل سرعة اللحام، استطاعة الليزر وغاز الحماية. وهذا بمقارنة نتائجه مع عمله التجريبي (2009) [14]. علاوة على ذلك، فقد لوحظ أن التوتر السطحي و معامل الحمل الحراري مارانجوني حساسان للعناصر النشطة في تكوين سبيكة المغنيزيوم. تؤثر هذه المتغيرات أيضًا على نمط تدفق السوائل في البركة المنصهرة.

S. Bag et al. [15]: تم إنجاز دراسة عددية و تجريبية لتحليل عملية انتقال الحرارة في بركة اللحام؛ و تحديد أبعاد بركة اللحام باستعمال اللحام الليزر النقطي، من خلال تطوير برنامج ثنائي الأبعاد باستخدام (INTEL Fortran Compiler)، حيث أهمل في دراسته تحليل تدفق السائل واعتبر أن قوانين الحفظ الكتلة و كمية الحركة يزيدان كثيرًا في تعقيد نموده.

Otto et al. [16]: إنجاز محاكاة عددية لانتقال درجة الحرارة من خلال عملية اللحام بشعاع الليزر مع إدراج الحرارة الكامنة من خلال تزايد درجات الحرارة أثناء الانتقال من الحالات التالية: الصلبة، السائلة، التبخر والتأين. ويشار أيضًا إلى أن سرعة السوائل جزء لا يتجزأ من خلال حل معادلة نافير ستوكس. و أن تبخر المادة، يؤدي إلى تمدد منطقة اللحام وكذلك ارتداد الضغط يؤدي إلى تشويه سطح ذوبان المادة.

الهدف من الرسالة هو دراسة التوزيع الحرارة وسرعة تدفق المائع في بركة اللحام، وكذلك تحديد حجم بركة اللحام من خلال اللحام بليزر مستمر على سبيكة من المغنيزيوم AZ91. نعمل على دراسة تأثير متغيرات الليزر وهي السرعة واستطاعة الليزر. تتضمن هذه الرسالة المواضيع التالية:

- 1 دراسة مفاهيم وأساسيات عملية اللحام بالليزر.
- 2 النمذجة الرياضية والعددية لتوزيع درجة الحرارة والسرعة في نموذج ثلاثي الأبعاد.
- 3 حساب التوزيعات الحرارية و كذلك السرعات في بركة اللحام بالليزر.

تحتوي هذه الرسالة على ثلاثة فصول:

الفصل I يستحضر الدراسة الوثائقية لوصف عملية اللحام بالليزر، من حيث المتغيرات سواء من العملية مثل: السرعة، الاستطاعة ونوع الانبعاث... الخ، أو من المواد المراد تجميعها مثل: الطبيعة، التحضير و الهندسة.. الخ. كما يركز على مبدأ اللحام بالليزر Nd: YAG المستمر ونقل الطاقة، وكذلك جميع الظواهر الفيزيائية التي تنشئ أثناء العملية، مع تحديد المصدر الحراري السطحي أو الحجمي. وكذلك المعدن الملحوم وهو سبائك المغنيزيوم AZ91 بسلك 2 mm ، واستعماله الواسع في عدة مجالات صناعية.

الفصل II يشرح عملية النمذجة العددية التي تعتمد على حل المعادلات التفاضلية لكل من المعادلة كمية الحركة والاستمرارية و الطاقة. في الإحداثيات الاسطوانية. تستخدم طريقة الحجم المنتهية بإعطائها شكل معادلات غوس صايدل أي ربطها بالزمان والمكان في شبكة منتظمة. تخضع المعادلات لشروط ابتدائية و حدية مناسبة. يتم تمثيل المصدر الحراري السطحي ودجمه مع معادلة

الطاقة، ويتم كذلك احتساب تغير في الطور بين الحالة الصلبة والسائلة من خلال مقارنة تدفق الطاقة والمحتوى الحراري للانصهار، وافترض تغير درجة الحرارة الخطي. يتم تقديم المخطط العام للحساب الخاص بالبرنامج المنفذ.

الفصل III يتضمن مختلف النتائج التي تم الحصول عليها من البرنامج العددي، حيث قمنا برسم منحنيات مختلفة لتوزيع درجات الحرارة وسرعة تدفق المائع، بدلالة أبعاد السبيكة من خلال تأثير كل من السرعة واستطاعة الليزر. وكذلك تحديد حجم بركة اللحام، و تتبع تطور عملية اللحام بمرور الزمن وتحديد مناطق الذوبان والتصلب. يقدم الفصل مناقشة النتائج ومقارنتها مع نتائج تجريبية منشورة.

الفصل I:

مفاهيم عامة وأساسيات دراسة

اللحام بالليزر

الفصل I:

مفاهيم عامة وأساسيات دراسة اللحام بالليزر.

1- مقدمة

في هذا الفصل، سنناقش المفاهيم العامة و المعلومات الأساسية حول عملية اللحام بالليزر وأهميتها في الصناعة. تكمن أهمية اللحام في نوع الليزر المستخدم ونوع المعدن الذي يتم لحامه. أولاً، نذكر معلومات عامة وأصناف عن عملية اللحام، ونتطرق إلى مفهوم الليزر، وطريقة عمله و المتغيرات التي تتحكم في طريقة عمله، واهم الآلات المستخدمة وأهميتها في الصناعة. ثانيًا، نستعرض أهم الظواهر الفيزيائية والكيميائية الناتجة عن عملية اللحام بالليزر، وكذلك معادلات الحفظ لتدفق المائع وشكل المصدر الحراري لتدفق الطاقة المتحكم في أغلب هذه الظواهر. ثالثًا، نعرف بالمزيج المعدني المستعمل وهو سبائك المغنيزيوم.

2- معلومات عامة حول اللحام

عملية اللحام هي الطريقة التي تسمح بإعادة بناء استمرارية المعادن بين أسطح العناصر التي يتم تجميعها وتحتل مكانة هامة في الصناعة وخاصة في صناعة القوارب، القطارات، الطائرات، الصواريخ، السيارات، الأنابيب، بناء الجسور و الخزانات..... الخ. الانصهار هي طريقة فعالة جدًا تسمح بتفعيل وتنظيف الأسطح لضمان تركيب الروابط المعدنية على مستوى الوصلة. يتطلب ذلك تدخل مصدر خارجي للطاقة يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة في الأجزاء الملحومة. وبالتالي يتم الحصول على وصلة لحام متجانسة بعد التصلب، من نفس تركيب قاعدة المعدن، ووصلة لحام غير متجانسة في حالة المعادن المختلفة. اللحام هي طريقة تتميز بظواهر الفيزيائية-الكيميائية المعقدة كثيرًا [17, 18, 19]. و يتضمن اللحام الخطوات التالية:

أ- تصميم المفاصل الملحومة.

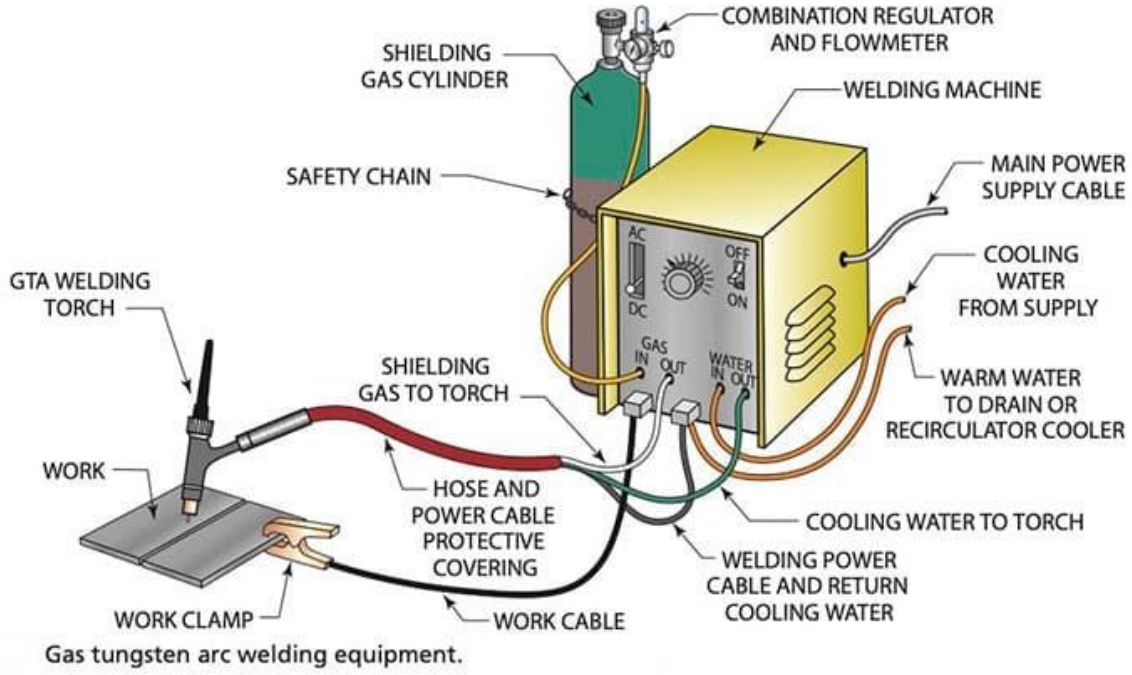
ب- إعداد القطعة قبل العملية أي هندسة الحافة، وحالة السطح.

ت- قياس جودة اللحام وقوة وصلة التجميع في الاستخدام.

3- أصناف عمليات اللحام

العديد من عمليات اللحام، لها مبادئ تنفيذ مختلفة جدًا، للحصول على ذوبان محلي في كل وصلة من قبل العناصر التي يتم تجميعها، وكذلك للحصول على استمرارية المعادن. يتم تصنيفها بسهولة على أساس الطاقة و مصادر الطاقة المختلفة كما هو مبين في الشكلين 1 و 2.

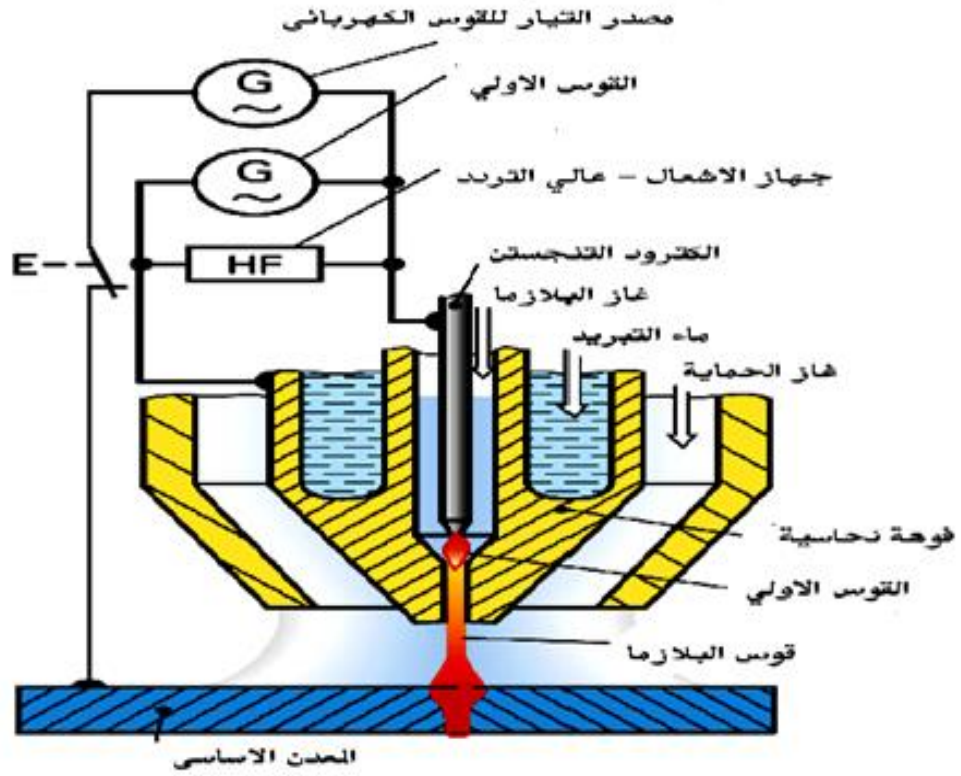
إنتاج لحامات عالية الجودة. في التطبيقات العملية تكون جودة اللحام هي الأساس؛ يوضح الشكل 3 مبدأ عمل لحام القوس الكهربائي [24].



الشكل 3: تركيب لحام القوس الكهربائي GTAW [24].

3-2- لحام البلازما

البلازما عبارة عن غاز مؤين جزئياً أو كلياً، وقد ينتج من أقواس يغذيها تيار مستمر. إحدى الطرق الأكثر شيوعاً للحصول على البلازما هي استخدام الغاز لزيادة قوس مشتعل في قناة ضيقة نسبياً ومبردة بالماء. يتم اختيار قطر الإلكترود ونوعية الغاز المشكل للبلازما وفقاً للشروط المطلوبة في عملية اللحام. يستخدم قوس البلازما في لحام الفولاذ المقاوم للصدأ، سبائك النيكل، المعادن وسبائك أخرى؛ يتم استخدامه في مختلف صناعات مثل صناعة الطائرات، السفن والصناعات البتروكيميائية وغيرها. ومن الأعمال المنجزة في هذه الطريقة [6, 25, 26]. يوضح الشكل 4 عملية لحام البلازما.



الشكل 4: تركيب عملية لحام البلازما [26].

تعتبر طريقة اللحام بالليزر من أحدث الطرق وأكثرها حداثة واستخدامًا في الصناعة، وفي هذا البحث سوف نقدم هذه الطريقة بالتفصيل لأنها محور بحثنا ودراستنا.

4- تعريف الليزر

تتكون كلمة الليزر من الأحرف الأولى (Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation) ما يعني تضخيم الضوء بالانبعاث المحفز. يعود تاريخ الليزر لسنة 1917، حيث بدأ مع ألبرت اينشتاين عندما درس طرق التفاعل بين الضوء و المادة. حيث وصف أول مرة ظاهرة الانبعاث المستحث؛ ولفهم كيفية عمل الليزر، يجب معرفة المفاهيم التالية [27, 28]:

• الامتصاص

يتم انتقال الإلكترونات من الحالة الأساسية للطاقة إلى مستوى الطاقة المثار. يكون هذا الانتقال ممكناً فقط عندما يكون فرق الطاقة بين هذين المستويين تشكل من طاقة الفوتون كالاتي:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (I.1)$$

• الإرسال العفوي

في هذه العملية، تنتقل الذرة عفويا من مستوى الطاقة المثار نحو مستوى طاقة أقل، محررة طاقة الفوتون $h\nu$.

• الإرسال المستحث

إذا واجه الفوتون الحادث ذرة في حالة إثارة، فإن التفاعل يحد من إثارتها ويحدث إرسال فوتون ثان بنفس الطاقة ونفس خصائص الفوتون الأول.

4-1- الانقلاب السكاني والضخ الضوئي

لتغليب الإرسال، يجب إثارة وسط نشط يحتوي على ذرات أو أيونات أو جزيئات لتحرير الطاقة عن طريق الإرسال المحفز. لذلك، يتطلب هذا التحفيز ملء مستوى الطاقة الأعلى، والفكرة هي الحفاظ على شرط $N_2 > N_1$ من أجل الحصول على خزان دائم من الذرات المثارة القادرة على الإرسال. هذا الشرط يشمل انقلابًا سكانيًا، حيث يحافظ التوازن الترموديناميكي الطبيعي على N_2 أكبر بكثير من N_1 ويمكن أن يكون هذا الضخ بطرق مختلفة: ضخ ضوئي، ضخ إلكتروني و ضخ كيميائي. تتميز الحزم الإشعاعية المرسله بالخصائص التالية:

• أحادي اللون: أي طول موجي واحد وهذا يرجع إلى الانبعاث المحفز الذي يصدر فوتونات متماثلة (نفس الطور ونفس التردد).

• الترابط (التماسك): يكون مصدر الليزر متماسك لأنه يرسل ذبذبات موجية ذات سعة و أطوار متماثلة، و هذا التماسك يكون بالشكلين المكاني والزمني.

4-2- طريقة الإرسال: يعمل الليزر بنمط متواصل أو نبضي حسب طبيعة الوسط أو طريقة التغذية المستعمل لتحفيز هذه الأنواع.

• نمط المتواصل: مدة الإرسال متواصلة؛ وهي أعلى من 0, 25 s.

• نمط النبض: تختلف مدة النبضات من فمتو ثانية إلى بضع عشرات من ميلي ثانية.

5- طريقة لحام الليزر

5-1- نظرة عامة

منذ أواخر سنوات 80، تم استخدام اللحام بالليزر نظرًا لانتماؤه إلى فئة من الحزم ذات كثافة طاقة عالية. وهذا ما يجعلها تتميز بقدرتها على تركيز عشرات كيلوواط من الاستطاعة على أسطح تبلغ بضعة أعشار من المليمتر المربع. بعد اجتياز مرحلة التطوير في مختبر الأبحاث إلى مرحلة التنفيذ على مواقع الإنتاج الصناعي وخاصة في قطاع السيارات، شهد الليزر أيضًا بعض التطبيقات السريعة في لحام القطع الصغيرة وفصل المواد، خاصة لحام الصفائح المعدنية الرقيقة. الليزر المستخدم صناعيًا لمعالجة المواد، وخصوصا في اللحام المعدني، هو ليزر YAG و الليزر CO_2 .

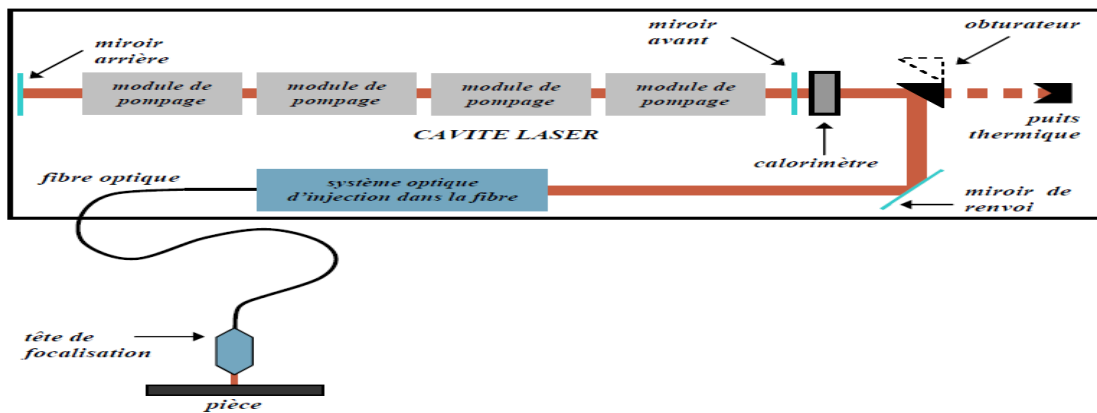
5-2- اللحام بالليزر CO₂

آلة اللحام بالليزر CO₂ تعمل بقوة على مبدأ الموجة المستمرة، وتعطي طول موجي $10.6 \mu\text{m}$ في مجال الأشعة تحت الحمراء. وسطه الفعال عبارة عن جهاز تفريغ كهربائي في غاز مبرد بالهواء أو الماء، يحوي أنبوب التفريغ على غاز ثنائي أكسيد الكربون (CO₂) بنسبة 10-20%، غاز النيتروجين (N₂) بنسبة 10-20%، مع نسبة قليلة من غاز الهيدروجين (H₂) والنسبة المتبقية من الهيليوم (He) تحت ضغط منخفض. يثير التفريغ الكهربائي جزيئات نيتروجين، التي تنقل الإثارة إلى جزيئات بعد ذلك إلى ثاني أكسيد الكربون. تتراوح استطاعة ليزر ثاني أكسيد الكربون الصناعي من 1500 W إلى 40000W [29].

5-3- اللحام بالليزر Nd:YAG

الليزر Nd:YAG هو الليزر الحالة الصلبة الأكثر استخدامًا في التطبيقات الصناعية والعلمية. يتكون الوسط الضوئي الفعال من شريط: العقيق الإيتريوم الألومنيوم (Aluminium Yttrium Garnet) (Y₃Al₅O₁₂) والمطعم 1020 بأيونات الثلاثي النيوديميوم (Nd³⁺). مع انبعاث موجة متناسقة إلى 1.06 m. الطول الموجي هو $1.06 \mu\text{m}$ ، لذلك يمكن نقل شعاع بالألياف الضوئية إلى عدة أمتار، مما يبسط إلى حد كبير في تنفيذ الليزر.

يتم نقل الطاقة إلى العنصر من خلال الضخ الضوئي لليزر Nd:YAG. يعمل بطريقة النبض. في هذه الحالة، يتم تنفيذ إثارة وسطه الفعال بواسطة مصباح وميض واحد أو اثنين لانبعاث متقطع. تكرر 300 نبضة في الثانية في زمن قدره (0.5ms إلى 10 ms)، ومتوسط الاستطاعة هو 500 W. يمكن أن تعمل أيضًا بشكل الموجة المستمرة (CW) من خلال الإثارة بمصابيح لانبعاث المستمر. حيث يتم إنشاء سلسلة من نبضات في مدة زمنية قدرها 0.2ms. بترددات عالية (1000 إلى 50000) نبضة في الثانية. تضخم حزمة طاقة ذهابًا وإيابًا متتاليًا في الوسط الفعال. التي تعزز التفاعل مع المادة [29]. يوضح الشكل 5 مبدأ عمل هذا الليزر.

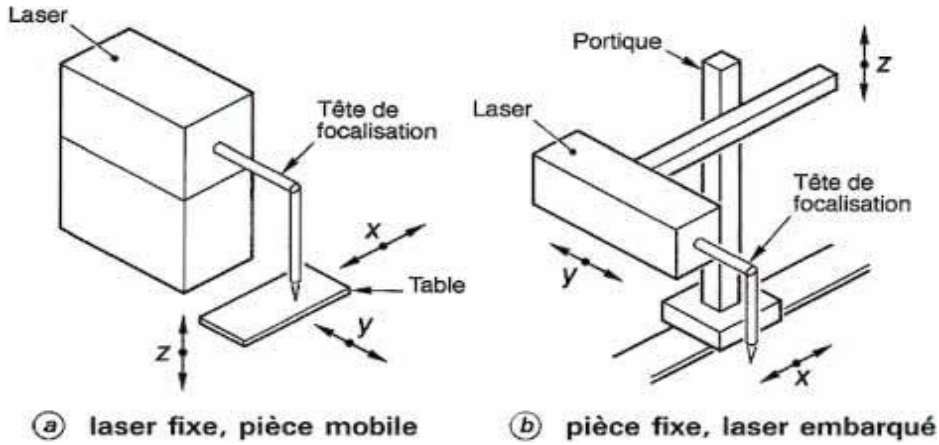


الشكل 5: رسم تخطيطي لمبدأ عمل الليزر YAG المستمر [29].

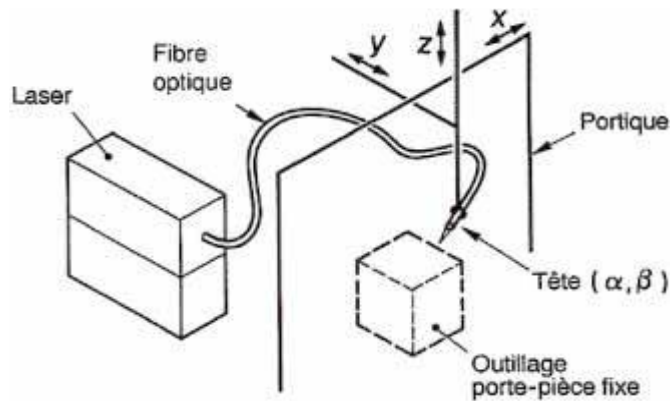
في هذه الدراسة سنناقش عملية اللحام بالليزر Nd:YAG ذات الانبعاث المستمر، نظرًا لاستعمالها الواسع في الصناعة، وخفة أجهزته، وسهولة حركتها، وإمكانية دورانها حول مناطق اللحام في جميع الاتجاهات.

4-5- أجهزة اللحام بالليزر Nd:YAG

يوجد العديد من آلات اللحام الليزر بأشكال مختلفة [30]. وهي عموماً آلات صغيرة أحادية الكتلة؛ حيث يكون الليزر ثابت وقطعة العمل متحركة أو العكس حسب الشكل 6، ويوجد شعاع الليزر المحمول على الألياف الضوئية بحيث يمكنه من الحركة في اتجاهات مختلفة حسب الشكل 7.



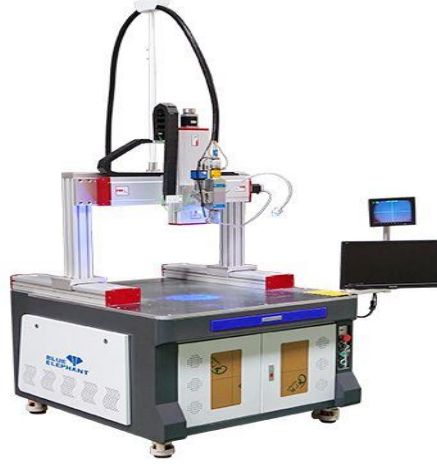
الشكل 6: آلات أحادية الكتلة للحام لليزر YAG [30].



الشكل 7: آلة اللحام بالليزر بألياف بصرية بخمسة محاور [30].

ومن بين الآلات الحديثة :

أ- آلة لحام الليزر الأوتوماتيكية ثلاثية الأبعاد، وهي مناسبة بشكل أساسي للإنتاج الضخم مثل لحام التداخل، ولحام الختم وعمليات اللحام الأخرى للمواد والأجزاء ذات الجدران الرقيقة. تتميز باستطاعة الليزر من 1000 W إلى 2000 W، ذات سرعة اللحام العالية، طول موجة شعاع الليزر 1080 nm، واستهلاك منخفض للطاقة، صيانة أقل واستقرار عالي [31].



الشكل 8: آلة لحام الليزر الأوتوماتيكية ثلاثية الأبعاد [31].

ب- تستخدم آلة لحام إصلاح القالب بشكل رئيسي في إصلاح القوالب على نطاق واسع. يتم التحكم في الماكينة بواسطة كمبيوتر صناعي صغير. الاستطاعة التي ينتجها الليزر YAG من 200 W إلى 400 W، يمكن أن يتحرك رأس الليزر للخلف وللأمام، ورفع يدوي، ويتم أيضا رفع وخفض قاعدة طاولة العمل كهربائياً [32]:



الشكل 9: آلة لحام إصلاح القالب [32].

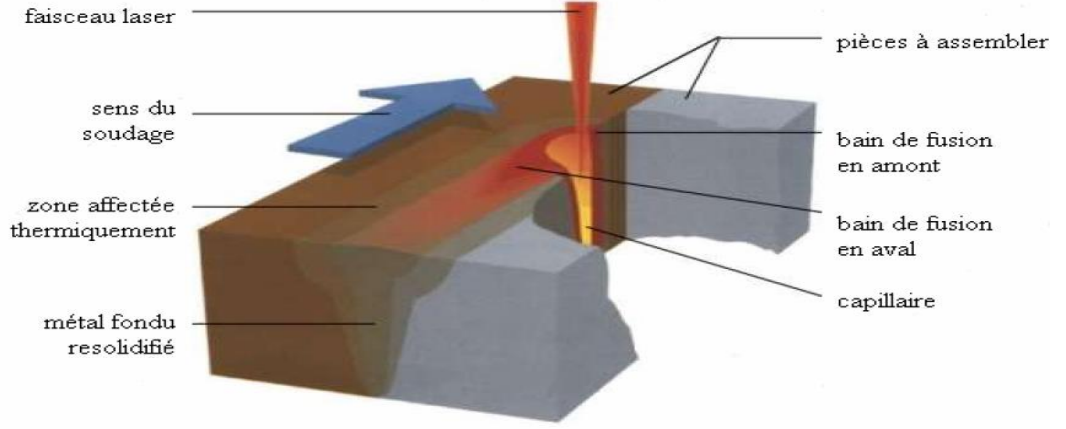
ت- آلة لحام بألياف الليزر المحولة، تستخدم للحام الصفائح المعدنية لمختلف المعادن وجمع الأجهزة. وهي مزودة بمسدس اللحام أكثر مرونة ويحقق اللحام لمسافات طويلة، يمكنها أيضاً إجراء عمليات القطع وتنظيف الأسطح. تتميز باستطاعة من 1000W إلى 2000 W، طول موجي 1080 nm، طول الألياف 10 m [33].



الشكل 10: آلة لحام بألياف الليزر المحولة [33].

5-5- مبدأ اللحام بالليزر

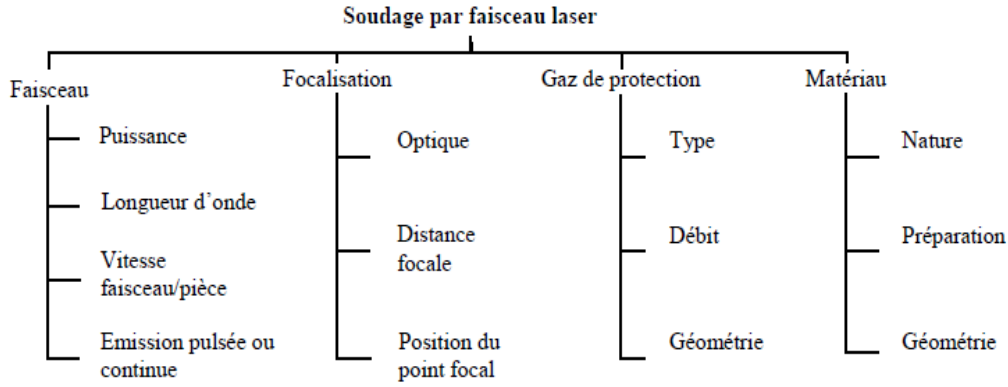
اللحام بشعاع الليزر هو إحدى عمليات اللحام عالية الطاقة (كثافة الطاقة 10^{10} W/m^2 إلى 10^{13} W/m^2). مصدر الحرارة هو طاقة كهرومغناطيسية على شكل فوتونات تشكل شعاعاً عالي الكثافة. عندما تصطدم الفوتونات بقطعة العمل، تتحول الطاقة الحركية للفوتونات إلى حرارة، مما يسبب ظاهرة الانصهار والتبخير (تشكل التجويف البخاري). هذا تبخر يخلق انخفاضاً محلياً في المعدن المنصهر، ويؤدي تدرج درجة الحرارة السائل نحو الجزء الخلفي من بركة اللحام. تسمح هاتان الظاهرتان بتكوين تجويف حول حزمة شعاع، مع الجدران تتألف من المعدن السائل المنصهر: يسمى هذا التجويف بالقناة البخارية. ينتقل هذا الذوبان بين أجزاء قطع العمل المراد تجميعها ثم يتصلب المعدن بعد مرور شعاع مما يسمح بتجميع القطع وفقاً للخطط الموصوفة [34]؛ يمكن تلخيصها في الشكل 11.



الشكل 11: مبدأ عملية اللحام بالليزر YAG [34].

5-6- متغيرات اللحام بالليزر

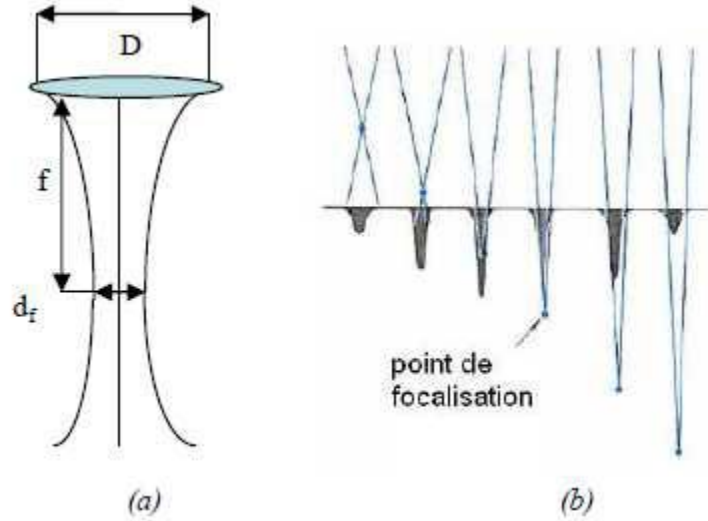
يعتمد لحام شعاع الليزر على العديد من المتغيرات المتعلقة بشعاع الليزر، ونظام التركيز المادي وغاز الحماية. يوضح الشكل 12 مختلف المتغيرات المشاركة في عملية اللحام بشعاع الليزر. في الفصل الثالث، سنوضح تأثير المتغيرات التكنولوجية للعملية، وهي استطاعة الليزر، سرعة اللحام وموضع النقطة البؤرية، على جودة و نوعية محور اللحام الذي تم الحصول عليه من خلال توزيع درجة الحرارة و السرعة.



الشكل 12: متغيرات عملية اللحام بالليزر [20].

5-6-1- البعد البؤري و موضع نقطة التركيز

تعتمد جودة اللحام من حيث العرض وعمق الاختراق بشكل كبير على البعد البؤري وموضع نقطة التركيز، حيث كلما كان الطول البؤري أقصر، يكون تركيز شدة الشعاع عند إلتقائه مع المادة أصغر وبتالي الطاقة أكبر. تشير الدراسات [35, 36] إلى أن موضع النقطة المحورية (التركيز) يعطي أداءً أفضل عند وضعها داخل المادة. كما هو موضح في الشكل 13، حيث أن D هو قطر شعاع على عدسة التركيز و f هو البعد البؤري و d القطر عند نقطة التركيز.



الشكل 13: a تركيز شعاع الليزر. b تأثير موضع النقطة المحورية مع التركيز على شكل عمق اللحام. [35].

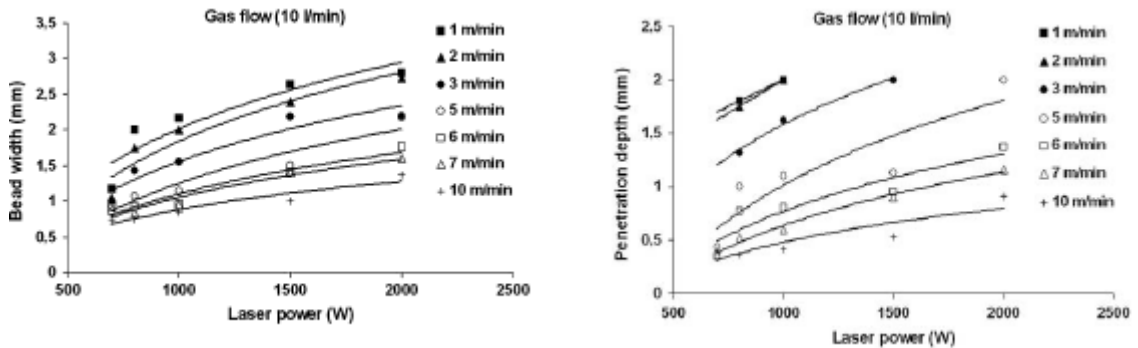
5-6-2- الاستطاعة والسرعة

تعد الاستطاعة وسرعة اللحام من المتغيرات المهمة لعملية اللحام، والتي يتم تعديلها وفقاً للمواد المراد لحامها. تمثل

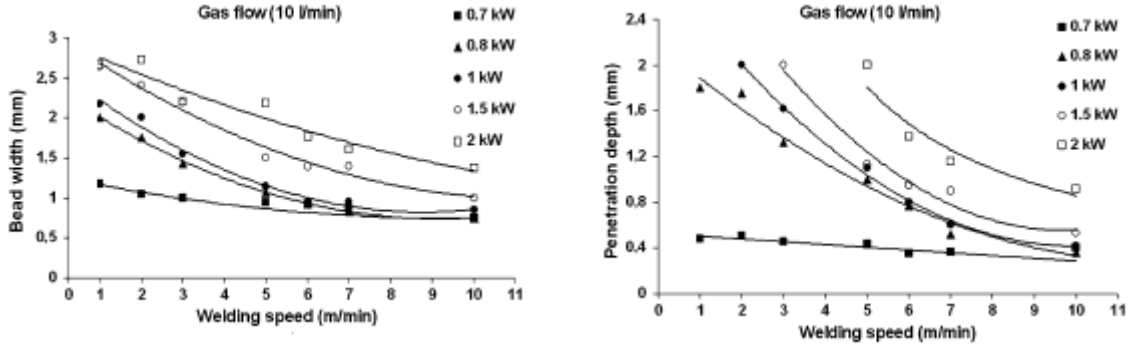
العلاقة التالية:

$$F=P/V \quad (I.2)$$

القوة التي تسمح بصهر المادة، بوحدة النيوتن. تشير الدراسات لسبائك المغنيزيوم من نوع (AZ61، AZ31) [36] و لسبائك المغنيزيوم من نوع (AZ91) [14]، إلى أنه عند تناقص سرعة اللحام و استطاعة ثابتة ينتج عنه زيادة في عمق اختراق وعرض محور اللحام. و أيضاً نفس التأثير بزيادة الاستطاعة و سرعة ثابتة، كما هو موضح في الشكلين 14 و 15.



الشكل 14: تأثير سرعة اللحام على عمق الاختراق وعرض محور اللحام [14].



الشكل 15: تأثير استطاعة الليزر على عمق الاختراق وعرض محور اللحام [14].

5-6-3- غاز الحماية

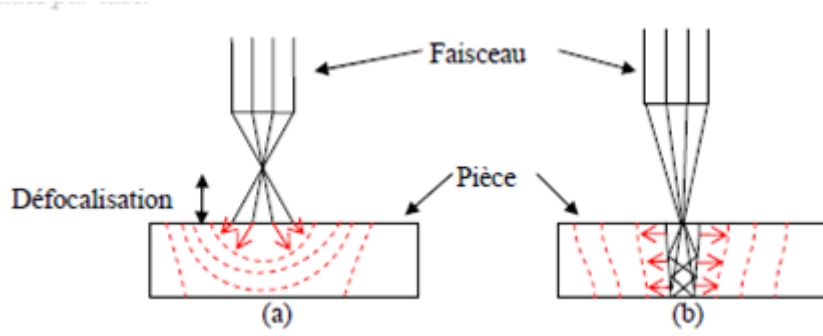
يستخدم غاز التدريع أو الحماية في عملية اللحام بالليزر للحصول على لحام عالي الجودة عن طريق منع أكسدة المعدن مع الجو المحيط به، وكذلك تثبيت أو إبطاء دور البلازما الناتجة عن تبخر المعدن، التي تعمل على توسيع المنطقة الذائبة وامتصاص جزء من طاقة الليزر. يستعمل غاز الحماية المكون من الأرجون بشكل واسع بسبب فعاليته في منع الأكسدة وتشكيل غطاء على منطقة اللحام، لأن كثافته أعلى من كثافة الهواء. يستخدم غاز الهيليوم على نطاق واسع لتجنب تكون البلازما وهو الغاز المفضل للحام الليزر CO_2 . المزيج المكون من غاز الأرجون/الهيليوم (بسبب السعر المرتفع لغاز الهيليوم)، يستعمل على نطاق واسع في اللحام الصناعي [37].

6- دراسة بعض ظواهر عملية اللحام الليزر

تحتوي عملية اللحام بالليزر على العديد من الظواهر الفيزيائية والكيميائية المعقدة التي هي في طور الدراسة و البحث المتواصل. نذكر البعض منها الموجود في عملنا:

6-1- نقل الطاقة

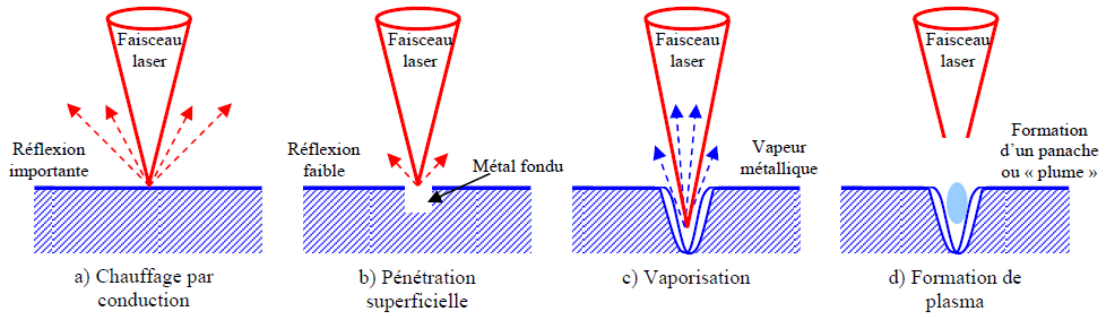
عند استخدام حزمة شعاع ذات طاقة عالية، يمكننا ملاحظة نمطين لنقل الطاقة اعتماداً على كثافة الطاقة المستلمة لسطح أكبر أو أقل من 10^5 W/mm^2 . إذا كانت أقل من هذه القيمة، فإن نمط نقل الطاقة هو التوصيل أو الناقلية، كما هو الحال مع الطرق التقليدية التي تنقل الحرارة من سطح القطعة. هذا النمط من النقل هو السائد في اللحام، يكون عمق اختراق اللحام منخفض. فوق هذه القيمة، يكون التسخين سريعاً جداً بحيث يتبخر المعدن ليشكل تجويفاً للبخار، يكون عمق اختراق اللحام مرتفع.



الشكل 16: نمط نقل الطاقة a: الناقلية b: التجويف البخاري [38].

6-2- تشكيل بركة اللحام أو الذوبان

التغيرات التي تحدث في المادة نتيجة التفاعل مع شعاع الليزر، يعتمد إلى حد كبير على حالة سطح المادة [39]. تفاعل شعاع/المادة ذو طبيعة معقدة وينطوي على الكثير من الآليات التي تعمل على تطوير بركة اللحام [17, 18, 19]، ومنه فإن تشكل بركة الذوبان خاصة في العمق، بطريقة اللحام بالليزر يكون وفقاً لمراحل كما يوضحه الشكل 17.

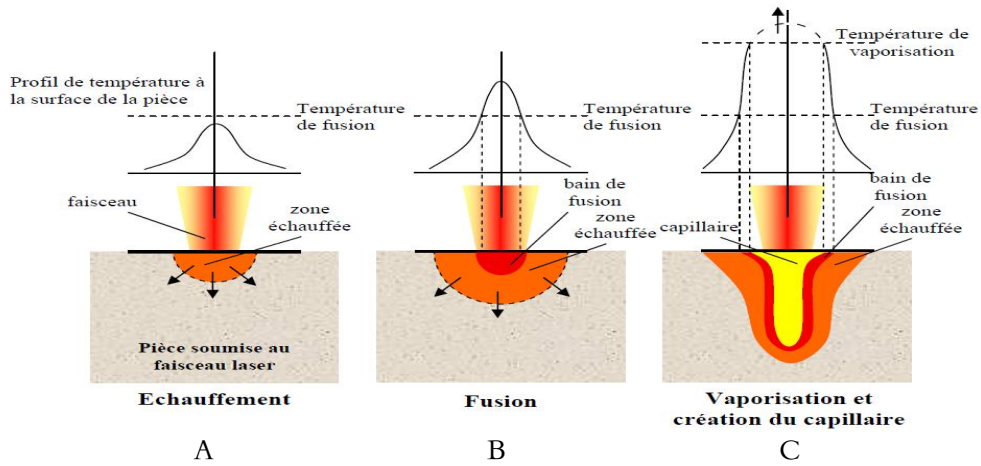


الشكل 17: مراحل تشكيل بركة الذوبان [19].

- تسخن المواد في الحالة الصلبة عن طريق التوصيل (a).
- تؤدي الطاقة الممتصة إلى إذابة المعدن في المنطقة المتأثرة بالحزمة الإشعاعية (b).
- يظهر بخار المعدن المتأين جزئياً ليشكل عموداً في وسط المكان المتأثر، بحيث يمتص شعاع الليزر، وينشر جزءاً منه (c,d).
- يزداد ضغط بخار المعدن في المنطقة المنصهرة على محيط الحزمة الإشعاعية ويتجه لأعلى (يكون هذا الفعل نتيجة لإثارة الذرات) مشكلاً تجويفاً للبخار من خلال التفاعل شعاع/المادة و الكثير من الآليات والظواهر التي يصعب السيطرة عليها، خاصة في درجات الحرارة المرتفعة. بالطبع، هذا التعقيد لا يكمن في تغيرات الخصائص الحرارية للمواد فقط بل أيضاً بأنواع اللحام و متغيرات اللحام.

3-6- تشكيل القناة البخارية أو تجويف البخاري

يتم وضع استطاعة ذات طاقة عالية في المكان المحدد على المادة (الحالة A)، يؤدي إلى ارتفاع ضغط بخار المادة الناتج وينقاد نحو جدران أو حواف المادة الذائبة (الحالة B). يعطي بعد ذلك ارتفاعاً على السطح وتجويفاً صغيراً ليشكل تدرجياً بئر ضيقة في المادة المنصهرة، والتي تشغلها البلازما و البخار المعدني، حيث يكون قطره أكبر بقليل من عرض حزمة شعاع الليزر، تصطف جدرانه داخل بركة الذوبان لتشكل التجويف أو القناة البخارية (الحالة C). الشكل 18 يوضح الحالات الثلاث.



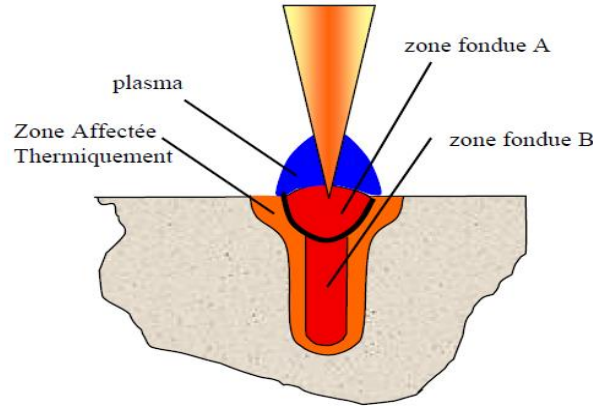
الشكل 18: تشكيل القناة البخارية [40].

تضعف استطاعة شعاع الليزر أثناء انتقاله عبر التجويف، إلى الحد الذي تستقر فيه الظاهرة عند الوصول إلى أقصى اختراق. تتحرك الحزمة الإشعاعية على طول المستوى المشترك للقطعتين، وبالتالي يترك المعدن المنصهر في الخلف أو الظهر مما يغلق القناة البخارية ويشكل محور اللحام. تؤثر القناة البخارية على معظم المعادن على النحو التالي:

- تشكيل اللحام دون إضافة معدن الحشو.
- قوة اختراق كبيرة، وتشوهات محدودة.
- سرعة تنفيذ عالية و دورات حرارية سريعة.

4-6- تشكل البلازما

يرافق إنشاء القناة البخارية تشكل البلازما على سطح بركة اللحام أو الذوبان. وهي مكونة من بخار المعدن المتأين الصاعد من التجويف في درجات حرارة عالية. اعتماداً على الطاقة الواردة، فإن البلازما يكون لها دور مهمًا في تحديد مورفولوجية محور اللحام، عن طريق تضخيم الجزء العلوي. كما هو موضح في الشكل 19.

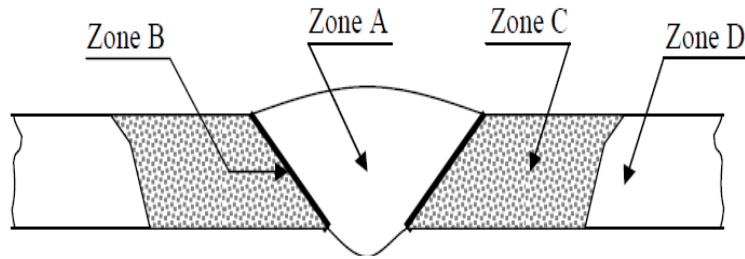


الشكل 19: تشكل البلازما على سطح بركة الذوبان [40].

- منطقة الانصهار **A**: نتيجة لتأثير عمل البلازما (إلى حد 60% من شعاع الممتص).
- منطقة الانصهار **B**: نتيجة عمل التجويف (الجزء المتبقي من الحزمة الواردة بعد الشعاع المنعكس).

6-5- دراسة مجهرية لوصلة اللحام المشترك

بالنسبة لعملية اللحام بالليزر YAG، تسمح الدراسة المجهرية لوصلة اللحام المشترك طرف بطرف بتمييز أربعة مناطق رئيسية كما هو مبين في الشكل 20:



الشكل 20: مجهرية مناطق اللحام المشترك [40].

أ- المنطقة المنصهرة **A**:

المنطقة المنصهرة **A** موجودة في مركز اللحام المشترك. تتحول هذه المنطقة في المادة إلى حالة سائلة أثناء تنفيذ اللحام. تكون حالة الانصهار مؤقتة ويتم الحصول على التصلب إما عن طريق توقيف مصدر الحرارة (لحام البقعة) أو بابتعاد مصدر الحرارة (لحام بالانصهار).

ب- منطقة الترابط **B**:

المنطقة الرابطة **B** الموجودة على جانبي المنطقة المنصهرة. في حالة وجود المعادن النقية، فإنه يمثل السطح المحيط بالمنطقة المنصهرة، الذي تجمدت بلوراته بموجب الرابطة المعدنية بقاعدة معدنية غير ذائبة. في حالة الخليط أو المعادن غير النقية، فمن الممكن تمييز مستوى المنطقة الرابطة لفعل الانصهار الجزئي بين التجمد و الذوبان.

ت- المنطقة المتضررة بالحرارة (اللبنة) C:

وهي موجودة خلف منطقة الترابط، وهي قاعدة المعدن، التي خضعت لدورات حرارية من اللحام، ويتجلى ذلك من خلال التغيرات المتعلقة بحالتها الأولية، وفي عرض هذه المنطقة (أكبر أو أقل). يرتبط عرض المنطقة المتضررة بالحرارة بالمواد وعملية اللحام المستخدمة، وظروف التشغيل (العمل). وهي منطقة ضيقة لأن التدرج في درجة الحرارة كبير. أضيف بكثيرةً لنفس المنطقة في لحامات أخرى مثل لحام الشعاع الإلكتروني و لحام القوس.

ث- المنطقة غير المتضررة D :

توجد خلف المنطقة المتضررة بالحرارة، لم يتأثر المعدن الأساسي في هذه المنطقة باللحام. على الأقل من التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي تنتج عنه ومن الحدود الخارجية للمنطقة المتضررة حراريًا.

7- المائع

1-7- تعريف المائع

المائع عبارة عن مادة (غاز أو سائل) تتميز بحركة جزيئاتها الشديدة، يمكنه التشوه بسهولة والتحرك تحت تأثير ضعيف جدًا. جميع الغازات والعديد من السوائل الشائعة مثل الماء و البنزين و الكحول نيوتونية. ومع ذلك، يوجد العديد من السوائل التي لا تتبع قانون نيوتن ندعوها السوائل غير النيوتونية مثل محاليل البوليمر و الشحوم و محاليل المطاط و الدم ومن أهم خواصه اللزوجة وقابلية للانضغاط. علاوة على ذلك، الموائع غير القابلة للضغط لها كثافة ثابتة ($\rho = cte$)، أما الموائع القابلة للانضغاط تكون الكثافة متغيرة ($\rho \neq cte$).

2-7- معادلات الحفظ

تعتمد دراسة ديناميكيات الموائع على ثلاثة مبادئ أساسية: مبدأ الحفظ على الكتلة، مبدأ الحفظ على كمية الحركة (معادلات نافيه-ستوكس) ومبدأ الحفظ على الطاقة. وهي معادلات تفاضلية جزئية تسمح بوصف عدد كبير من الظواهر ذات تطبيقات مختلفة في المجالات البحثية و التطبيق وترجمتها إلى حلول عديدة.

يعبر عن قوانين أو مبادئ الانحفاظ بشكل عام بالعلاقة التالية [41, 42]:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}\Phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\Phi) + S \quad (\text{I.3})$$

Φ ، Γ و S هي متغيرات من أجل معادلات الحفظ المختلفة كما يوضحه الجدول 1.

الجدول 1: المتغيرات Φ و Γ و S لمعادلات الحفظ.

| معادلات الانحفاظ | Φ | Γ | S |
|------------------|---|-------------|--|
| الكتلة | 1 | - | - |
| كمية الحركة | (سرعة) \vec{V} | m | - القوى الحجمية - تدرج الضغط - كل قوى اللزوجة |
| الطاقة | E (الطاقة) H (الحرارة الكامنة) T (درجة الحرارة) | λ/c | - المصدر الطاقوي الحجمي - تبديد اللزوجة - تغيرات الاستطاعة |

8- المصدر الحراري

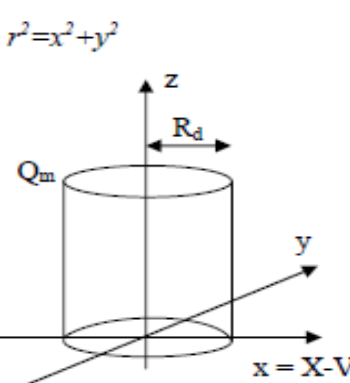
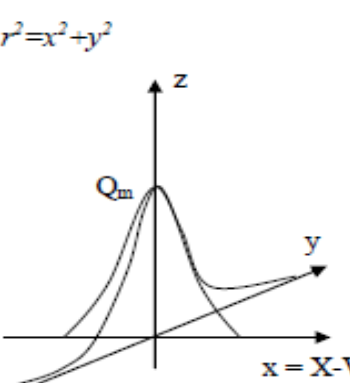
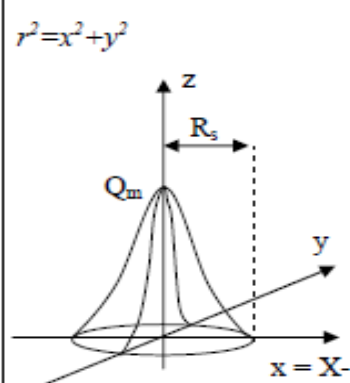
تنشئ طاقة الليزر تجويفاً يتكون من بخار المعدن تحت تأثير توزيع الطاقة في الجزء المعدني. يمكن تقسيم المصدر الحراري لهذه الطاقة إلى نمطين: نمط التوصيل ونمط وضع التجويف [43].

يتميز نمط التوصيل بانخفاض الطاقة و السرعة؛ تتسرب الطاقة إلى سطح المعدن المستهدف، مما يعطي مصدر الليزر طابعاً سطحيًا. في نمط التجويف، تكون الطاقة والسرعة أعلى وتنتشر الحرارة داخل التجويف البخاري، يعطي مصدر حجري [43].

8-1- مصدر الحرارة السطحي

يستخدم نموذج مصدر الحرارة السطحي بشكل أساسي للدراسة العددية للحام بالتوصيل. الطاقة الموزعة على السطح هي بشكل عام Gaussian. يمكن تمييز ثلاثة افتراضات لهذا التوزيع كما هو موضح في الشكل 21.

- توزيع ثابت للطاقة على قرص نصف قطره R.
- حالة توزيع الاحتمالي ل غاوسي لانتهائي.
- حالة توزيع غاوسي محدود على قرص نصف قطره R.

| Source surfacique : $q(x,y) = Q_0 \cdot f(x,y)/A = Q_m \cdot f(x,y)$ en W/m^2 | | |
|---|--|---|
|  <p>$r^2 = x^2 + y^2$</p> |  <p>$r^2 = x^2 + y^2$</p> |  <p>$r^2 = x^2 + y^2$</p> |
| <p>Constante sur disque de rayon R_d</p> | <p>Gaussienne à répartition infinie</p> | <p>Gaussienne de répartition finie sur disque de rayon R_s</p> |
| <p>$q(x,y) = Q_m$</p> <p>$R = \sqrt{\frac{Q_0}{\pi \cdot Q_m}}$</p> | <p>$q(x,y) = q(r) = \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$</p> <p>$q(x,y) = q(r) = Q_m \cdot \exp(-K \cdot r^2)$</p> <p>$K = \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} \quad ; \quad Q_m = \frac{Q_0 \cdot K}{\pi}$</p> | <p>$q(x,y) = q(r) = \frac{3 \cdot Q_0}{\pi \cdot R_s^2} \cdot \exp\left(-\frac{3r^2}{R_s^2}\right)$</p> <p>$q(x,y) = q(r) = Q_m \cdot \exp\left(-\frac{3r^2}{R_s^2}\right)$</p> <p>$q(x,y) = 0$ si $r > R_s$</p> <p>$Q_m = \frac{3 \cdot Q_0}{\pi \cdot R_s^2}$</p> |
| <p>$A = \pi \cdot R_d^2$</p> <p>$f(x,y) = 1$</p> | <p>$A = \frac{\pi}{K}$</p> <p>$f(x,y) = \exp(-K \cdot r^2)$</p> | <p>$A = \frac{\pi \cdot R_s^2}{3}$</p> <p>$f(x,y) = \exp\left(-\frac{3r^2}{R_s^2}\right)$</p> |
| | <p>$K = \frac{3}{R_s^2}$</p> | |

الشكل 21: نماذج المصدر الحراري السطحي [40].

حيث $q(x,y)$ هي كثافة التدفق السطحي بوحدة W/m^2 ، Q_0 الاستطاعة الممتصة، A ثابت مكافئ للمساحة بوحدة m^2 ، $f(x,y)$ دالة التوزيع السطحي لمصدر، σ الانحراف المعياري الذي يعكس الانتشار المكاني غاوسي، R_s هو نصف قطر القرص، r هو نصف القطر حيث أن $r^2 = x^2 + y^2$.

يمكننا أن نجد بعض الدراسات حول المصدر السطحي، الذي يعطي العبارة التالية بوحدة W/m^2 [44,45].

$$Q = \frac{2\eta P}{\pi r_l^2} \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\pi r_l^2}\right) \quad (I.4)$$

حيث P هي استطاعة الليزر (W)، η هي مردود العملية، r_l هو نصف قطر شعاع الليزر المركز (mm).

ويمكن أن نجد أيضاً عبارة المصدر الحراري السطحي في المرجع [46] على النحو التالي:

$$Q_s(r, \theta, t) = \begin{cases} Q_m \exp\left(\frac{-r^2}{R_s^2}\right) & r \leq 2R_s \\ 0 & r > 2R_s \end{cases} \quad (I.5)$$

$Q_s(r, \theta, t)$ هو التوزيع السطحي عند $z = 0$, Q_m هو إجمالي طاقة الليزر.

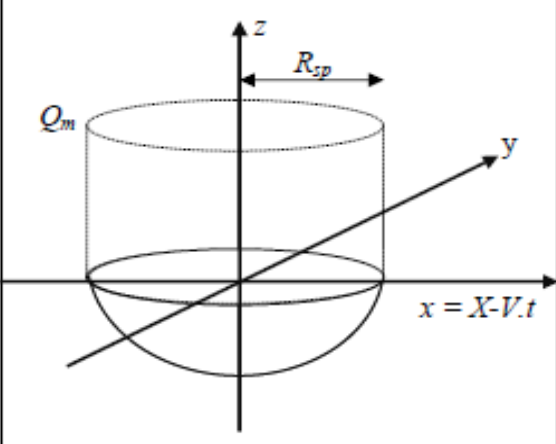
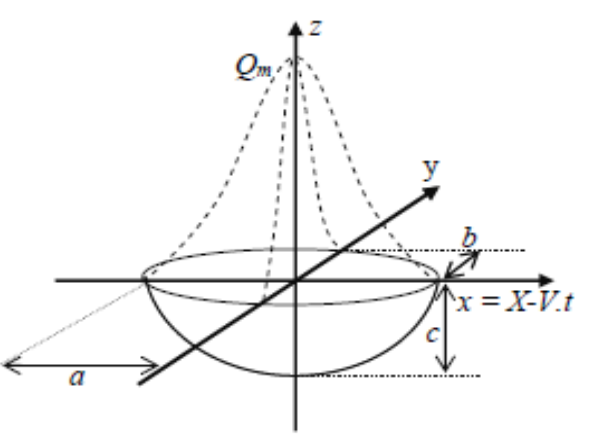
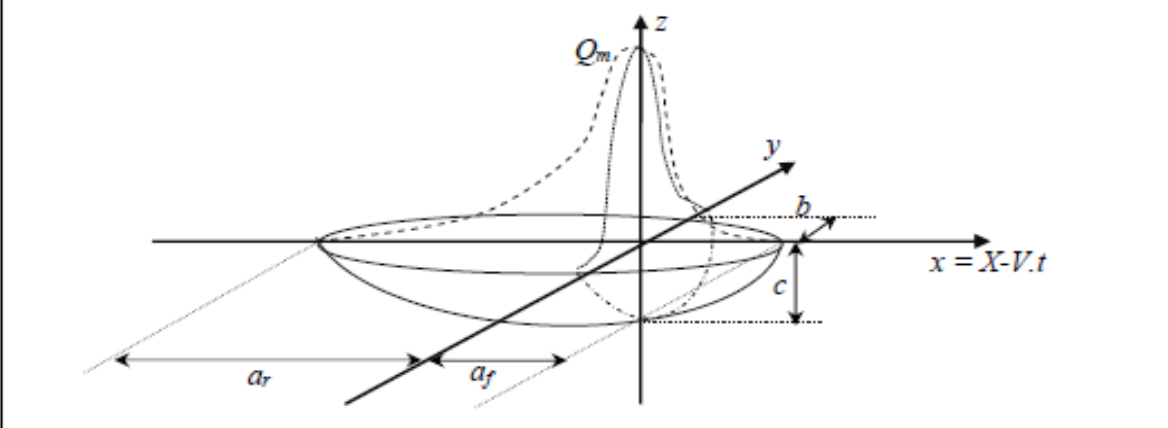
8-2- مصدر الحرارة الحجمي

في حالة اللحام بحزمة عالية الطاقة، تترسب الطاقة في عمق المادة بفضل إنشاء تجويف بخاري. في هذه الحالة يتم استخدام مصدر الحرارة الحجمي؛ تتوزع الطاقة على حجم من سبيكة بوحدة W/m^3 . هذا النوع أكثر ملائمة في تجسيد المصدر الحراري الفعلي في معادلة الحرارة. و تتميز فيه ثلاثة اقتراحات حسب الشكل 22 [13,47]:

أ- توزيع حجمي ثابت على دائرة نصف قطرها R_{sp} .

ب- توزيع غاوسي (Gaussian) $D3$ بتوزيع محدود على الشكل البيضاوي أو الإهليلجي لأنصاف الأقطار c , a , b .

ت- توزيع غاوسي $D3$ بتوزيع محدود على شكل الإهليلجي مزدوج من أنصاف أقطار a_f , a_r , b , c , هذا النموذج هو الأكثر تمثيلاً للمصدر الحراري من سابقه.

| Source volumique : $q(x,y) = Q_0 \cdot g(x,y,z)/B = Q_m \cdot g(x,y,z)$ en W/m^3 | |
|--|--|
|  |  |
| <p>Constante sur sphère de rayon R_{sp}</p> | <p>Gaussienne 3D à répartition finie sur ellipsoïde de rayons a, b, c</p> |
| $q(x, y, z) = Q_m$ | $q(x, y, z) = Q_0 \frac{6\sqrt{3}}{abc\pi^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$ |
| $B = \frac{2\pi R_{sp}^3}{3}$ $g(x, y, z) = 1$ | $B = \frac{abc\pi^{3/2}}{6\sqrt{3}}$ $g(x, y, z) = \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$ |
|  | |
| <p>Gaussienne 3D à répartition finie sur double ellipsoïde de rayons a_f, a_r, b, c</p> | |
| $q(x, y, z) = Q_0 \frac{6\sqrt{3} \cdot f_\xi}{a_\xi b c \pi^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{3x^2}{a_\xi^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$ <p>avec $\xi = f$ ou r selon que x est positif ou négatif et $f_f + f_r = 2$</p> $f_f = \frac{2a_f}{a_f + a_r} \text{ et } f_r = \frac{2a_r}{a_f + a_r}$ | |

شكل 22: نماذج المصدر الحجمي. [13]

وفي هذا الصدد نجد أعمال ومقالات منها: [48] حيث تم اقتراح شكلاً من نصفين اهليلجين مع الأخذ في الاعتبار حركة المصدر. حسب شكل 22، فإن تعبيره هو:

$$Q(x, y, z) = Q_0 \frac{6\sqrt{3}f\xi}{a\xi \cdot b \cdot c \cdot \pi^2} \exp\left(-\frac{3x^2}{a\xi^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (\text{I.6})$$

يوصي Goldak بأخذ المسافة قبل المصدر f تساوي نصف عمق الاختراق، و المسافة خلف المصدر a تساوي ضعف عمق الاختراق.

في المرجعين [13, 49] تم استخدام المصدر الحجمي بناءً على النموذج Goldak باستخدام العبارة التالية:

$$Q(x, y, z) = \frac{3p}{\pi \cdot a \cdot b \cdot d} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{d^2}\right) \quad (\text{I.7})$$

حيث P هي الاستطاعة الكلية لشعاع الليزر. المتغيران a و b يساويان نصف القطر البؤري لشعاع الليزر، وتمثل d الحد الأقصى للعمق.

9- المعدن المستعمل: سبائك المغنيزيوم (magnesium alloys)

المعدن المستعمل في بحثنا عبارة عن سبائك المغنيزيوم ويتم الحصول عليها في الغالب بمزج المغنيزيوم مع الألمنيوم و النحاس و الزنك و الزركونيوم و المنغنيز. تعتبر سبائك المغنيزيوم مثالية للتطبيقات المختلفة التي يكون فيها تخفيض الوزن مفيداً (أجزاء الماكينة) أو ببساطة بسبب قابلية النقل (الأدوات اليدوية، أمتعة). بفضل خصائصه الفيزيائية و الميكانيكية مثل كثافتها المنخفضة، القوة العالية، الاستقرار الجيد الأبعاد وقدرتها الجيدة على التخميد. إن الجمع بين هذه الصفات في المادة يعطي منتجات و هيكل لها خصائص عالية ووزن منخفض؛ وهذا ما يجعل العديد من القطاعات الصناعية تميل إلى استبدال سبائك الفولاذ و الألمنيوم بسبائك المغنيزيوم. ويمكن تقسيم سبائك المغنيزيوم إلى مجموعتين: سبائك المسبك أو الصب و سبائك المعمولة.

أ- سبائك المسبك أو الصب (Cast magnesium):

يتم الحصول عليها عن طريق صب المسبوكات السائلة في الرمل أو الجبس أو قوالب... الخ. تسمح الحرارة النوعية المنخفضة بالتصلب السريع للمعدن قبل إزالة القوالب، مما يسمح باستقرار الأبعاد في أجزاء المسبك وهي مقسمة إلى فئتين [51, 50]:

• سبائك المغنيزيوم والألمنيوم (Other magnesium alloys):

تحتوي هذه السبائك على 85% على الأقل من المغنيزيوم مع إضافات من الألمنيوم (حتى 10%) و الزنك (أقل من 3%) و المنغنيز (>0.6%)، كل عنصر من هذه العناصر يحسن خصائص سبيكة (انظر الملحق 2). يتم صب هذه السبائك عن طريق الجاذبية أو الضغط.

• سبائك جيدة التشكيل (Die cast magnesium alloy):

تتكون هذه السبائك من المغنيزيوم وعناصر إضافية من الأتربة النادرة مثل الثوريوم و الزركونيوم (WE54، WE43، QE22، HZ32، ZH62، ZE41...). تعطيها عناصر الأتربة النادرة خصائص ميكانيكية جيدة، مما يجعلها سبائك ذات قابلية جيدة للتشكيل (صب ممتاز) ويمكن لحامها بسهولة. يساهم كل عنصر من عناصر الأتربة النادرة في تحسين خصائص السبيكة (انظر الملحق 2).

ب- سبائك المطاوعة أو المعمولة (Wrought magnesium alloys):

تستخدم سبائك المغنيزيوم للحصول على سبائك رقيقة أو خيوط رفيعة من خلال تشوه (شد وتوجيه) النسيج البلوري بفعل الحراري مما يؤدي إلى تباين الخواص، ونجد فيها ست مجموعات فرعية وهي [50]:

أ- سبائك الألمنيوم والزنك.

ب- سبائك الزركونيوم بدون الثوريوم.

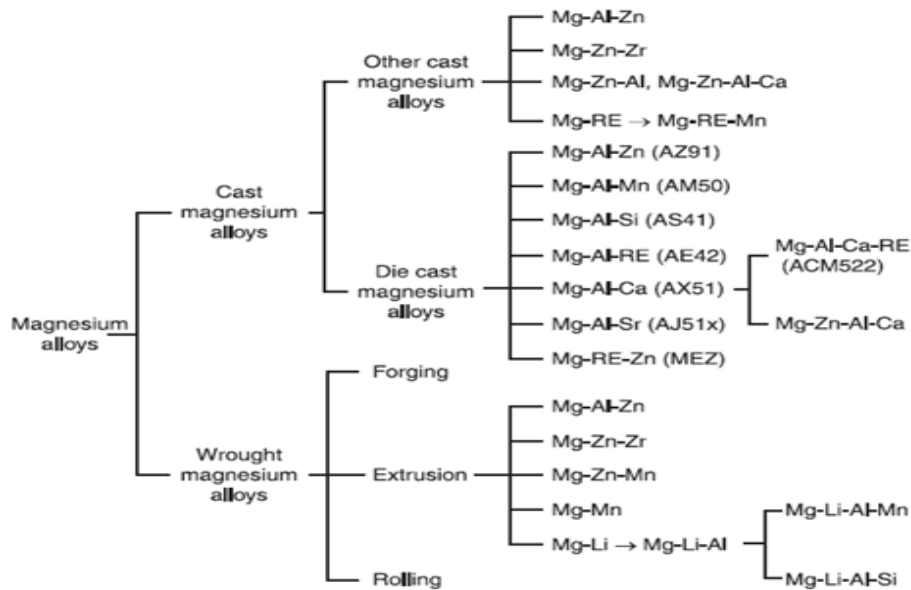
ت- سبائك الثوريوم.

ث- سبائك المنغنيز.

ج- سبائك الليثيوم.

ح- سبائك الأتربة النادرة.

يمكن توضيح أقسام أو تصنيفات سبائك المغنيزيوم وفقاً للشكل 23.



الشكل 23: تصنيفات سبائك المغنيزيوم [50].

9-1- ايجابيات و سلبيات سبائك المغنيزيوم

تمتع سبائك المغنيزيوم بالعديد من المحاسن أو المزايا الجيدة مقارنة مع الكثير من المعادن، لكن لها بعض السلبيات أو العيوب التي يجب مراعاتها عند الاستعمال. [34، 52]

أ- الايجابيات: نذكر منها ما يلي:

- تسمح الناقلية الحرارية العالية لها بالتبادل الحراري بسهولة.
 - قدرة عالية على تخميد الاهتزازات مما يعطي مقاومة جيدة للصدمات.
 - تضمن خصائص تشكيل جيدة و الحرارة النوعية المنخفضة والتبريد السريع للمعدن.
 - قدرة ميكانيكية أفضل مقارنة بالعديد من المعادن و قابلية لحام جيدة لمعظم السبائك.
 - احتياطي وفير وقابل لإعادة التدوير بالكامل.
 - خصائص كهرومغناطيسية جيدة: مفيدة للعمل كشاشة ضد التداخل الكهرومغناطيسي.
 - الكتلة الحجمية منخفضة مقارنة بسبائك الفولاذ و الألمنيوم (الجدول 2) ، مما يسمح باستعمالها لتقليل الوزن.
- الجدول 2: مقارنة الكتلة الحجمية و الناقلية الحرارية لسبائك المغنيزيوم و الألمنيوم.

| المعدن | الكتلة الحجمية (g/cm ³) | الناقلية الحرارية (W/m k) في 20°C |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| سبائك المغنيزيوم | 1.74 | 75 |
| سبائك الألمنيوم | 2.66 | 126 |

ب- السلبيات: نذكر منها ما يلي:

- معامل مرونة منخفض ومقاومة محدودة في درجات الحرارة العالية.
- الحاجة إلى المعالجة السطحية.
- الميل إلى الأكسدة عند درجة الحرارة العالية.

9-2- سبائك المغنيزيوم في الصناعة

سبائك المغنيزيوم خفيفة الوزن، حوالي 2/3 من الألمنيوم و 1/4 من الحديد، ولها قوة وصلابة عالية. مما جعلها تستخدم على نطاق واسع في القطاعات الصناعية نذكر منها مايلي:

أ- قطاع الطيران الجوي

تستعمل سبائك المغنيزيوم بشكل واسع في صناعة المحركات الجوية لتحسين الخواص الميكانيكية وتقليل الوزن، سواء في الطيران المدني أو العسكري، مثل (F119، F22)، والتي تستعمل سبائك WE43.

نظرًا لخصائصها الميكانيكية الفائقة مقارنة بالسيبكية RZ5، وتدخل أيضًا في صنع علب التروس، عجلات الهبوط، تركيبات دوار المروحية.

ب- قطاع صناعة السيارات

الزيادة السريعة لاستخدام المغنيزيوم بشكل كبير في صناعة السيارات، حيث تحتوي السيارة على حوالي 20Kg من المغنيزيوم، مما يوفر 20% إلى 25% من وزنها مقارنة بالألومنيوم [53]؛ بالإضافة إلى ذلك، تمتص الاهتزازات بشكل أفضل وتقلل الضوضاء. تدخل سبائك المغنيزيوم في صناعة ناقل الحركة، المكابح، أجزاء القابض، الأغلفة و أعطية رؤوس الأسطوانات....الخ.

ت- التطبيقات الإلكترونية

أدى التطور التكنولوجي السريع في الإلكترونيات إلى زيادة الطلب على استخدام سبائك المغنيزيوم الصب في العديد من المنتجات مثل أجهزة الكمبيوتر، الكاميرات، الهواتف المحمولة و أجهزة العرض.....الخ. ومن المزايا المختلفة يمكن ذكر: خفة وزنها، تبديد الحرارة، حصر مجالات الكهرومغناطيسية وتبديد ترددات الراديو، أي القدرة على التكيف مع التداخل الكهرومغناطيسي، الصلابة و القوة في المنتج و أخيرًا قابلية إعادة التدوير [54].

ج - تطبيقات أخرى

كما تدخل سبائك المغنيزيوم في قطاعات أخرى مثل القطاع التجاري في صناعة السلام، الأدوات اليدوية و الأمتعة....الخ. وفي القطاع الطبي في صناعة الكراسي المتحركة، أجهزة تقويم العظام، المعدات الطبية المحمولة....الخ. وأيضًا في القطاع النووي كمادة لتغطية الوقود وذلك لأن المغنيزيوم لا يختلط مع اليورانيوم، و الميل المنخفض لامتصاص النيوترونات.

الفصل II:

النمذجة العددية للحام سبيكة

المغنيزيوم AZ91

الفصل II

النمذجة العددية للحام سبيكة المغنيزيوم AZ91

1- مقدمة

في هذا الفصل، بعد تحديد الظاهرة الفيزيائية والنمذجة الرياضية سوف نقدم النمذجة العددية المستخدمة لحساب توزيع درجة الحرارة وسرعة تدفق المائع وكذلك تحديد حجم وعرض بركة اللحام. اعتمدنا في هذا العمل على الدراسة العددية لظاهرة اللحام بشعاع الليزر الصلب Nd: YAG المستمر، لسبيكة من مزيج المغنيزيوم التي تم تحقيقها بواسطة الأبعاد الثلاثية (r, z, θ) للإحداثيات الأسطوانية. مع إدراج البعد الرابع وهو الزمن في كل نقطة من نقاط الشبكة، بواسطة حل معادلات حفظ الحركة والطاقة ومعادلة الاستمرارية التي تم برمجتها باستخدام طريقة الحجم المنتهية و باستخدام لغة البرمجة فورتران.

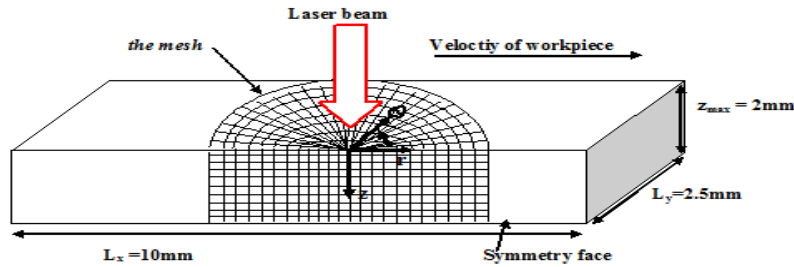
2- تعريف الظاهرة الفيزيائية:

يحتوي تفاعل الليزر مع المادة أثناء اللحام على العديد من الظواهر الفيزيائية - الكيميائية. ومن إحدى الظواهر الفيزيائية الناتجة عن اللحام بالليزر التي تمت دراستها في هذا النموذج العددي هي توزيع درجة الحرارة وسرعة التدفق المائل في بركة اللحام. يعتمد هذا على الخصائص السائلة والصلبة للمادة و القوى الناشئة أو الناتجة مثل قوة التوتر السطحي، قوة مارانجوني وقوة الطفو، وهى القوى الدافعة الرئيسية لتدفق السوائل في بركة اللحام.

في دراستنا، تعتمد الصيغة الرياضية للنموذج العددي على الفرضيات التالية:

- اعتماد نمط التوصيل الحراري للطاقة.
- تكون قطعة العمل مبدئيًا عند درجة الحرارة $T_0 = 300 \text{ K}$.
- تم التحقق من افتراض Boussinesq [55] الذي ينص على أن الكثافة ثابتة (الفروق الصغيرة في الكثافة تهمل) باستثناء حد قوة الطفو.
- تدفق المائع صفحي وغير قابل للضغط.
- الخواص الحرارية الفيزيائية ثابتة في كل مرحلة صلبة وسائلة.
- شعاع الليزر غير متحرك. يتم أخذ الانبعث بنمط استمرار الاستطاعة P .
- قطعة العمل لها سرعة ثابتة V_w بالنسبة لشعاع الليزر.

يوضح الشكل 25 عملية اللحام بالليزر وشبكة الحساب العددي. تتحرك قطعة العمل في اتجاه x الموجب (V_w), $L_x = 10\text{mm}$ و $L_y = 2.5\text{mm}$ هما على التوالي أبعاد نصف السبيكة المراد لحامها. Z_{\max} هو سمك السبيكة المراد لحامها و R_{\max} هو الحد الإشعاعي لمجال الحساب. يتم اختيار الإحداثيات الأسطوانية المحلية r و Z لحساب شعاع الليزر نصف قطره $R_0 = 0.6\text{mm}$. للحساب العددي يتم أخذ شبكة منتظمة على سبيكة المزيج المعدني واتخاذ خطوة زمنية ثابتة.



الشكل 24: رسم تخطيطي لعملية اللحام بالليزر وشبكة الحساب العددي.

3- بعض القوى الناتجة

أثناء عملية اللحام بالليزر، تنشأ قوى لها تأثير كبير على شكل و توازن بركة اللحام وعلى توزيع درجة الحرارة ونذكر منها:

3-1- قوة الطفو

عند اللحام تهاجر بعض الجزيئات أو الجسيمات من المنطقة السائلة إلى المنطقة الصلبة والعكس أيضا صحيح، مما يؤدي إلى إعادة توزيع المادة بين الصلبة والسائلة. هذه الحركة ناتجة عن اختلاف الكثافة تحت تأثير الجاذبية [56]، ويتم التعبير عنها بالعلاقة التالية ضمن معادلة كمية الحركة:

$$F = \beta \rho g (T - T_a) \quad (\text{II.1})$$

حيث أن g يمثل تسارع الجاذبية (m s^{-2}), ρ الكثافة (Kg m^{-3}), β معامل التمدد الحراري (K^{-1}), T درجة الحرارة (K), T_a درجة الحرارة المحيطة.

3-2- التوتر السطحي وحمل مارانجوني

تنشأ قوة التوتر السطحي في الحالة السائلة للمعدن نتيجة تلامس الجسيمات بالسطح الحر للسبيكة المعدنية بالهواء أو الغاز، فيزداد الترابط بينهم مقارنة مع الجسيمات الداخلية أين تكون مترابطة مع بعضها البعض في كل الاتجاهات. تعتمد

قيم التوتر السطحي أيضاً على درجة الحرارة و تركيز السائل، حيث ينخفض التوتر السطحي مع زيادة درجة الحرارة. تعطي قوة التوتر السطحي بالعلاقة التالية [57]:

$$\delta(t) = \delta_0 - A_\delta(T - T_V) \quad (\text{II.2})$$

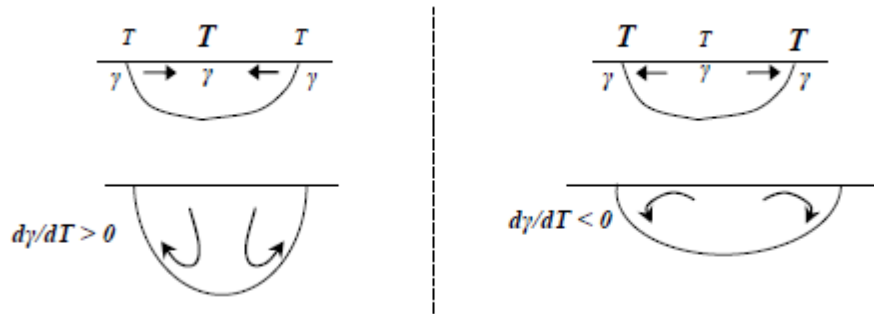
حيث أن δ هو توتر السطح وحدته (N/m)، δ_0 توتر سطح في نقاط الغليان، A_δ ثابت التدرج لتوتر السطح. ($\text{N K}^{-1}\text{m}^{-1}$), T درجة الحرارة و T_V درجة حرارة الغليان (K).

إن وجود تدرج في التركيز السائل أو المائع بسبب عدم تجانس في توزيع الشوائب و أيضاً التدرج في توزيع درجة الحرارة يؤدي إلى هجرة الجسيمات من مناطق منخفضة التوتر السطحي إلى مناطق مرتفعة التوتر السطحي. وهذه التيارات تعرف بحمل مارانجوني تعطي ب [25].

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} \quad (\text{II.3})$$

إذا كان:

- $\frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0$ يكون اتجاه التدفق مارانجوني سالب في حالة المعادن النقية و المزيج المعدني، حيث يكون عندها أعلى مستوى لتوتر السطح بين المنطقة الصلبة والسائلة وبالتالي يتم انتقال المعدن من المنطقة المركزية الساخنة إلى حواف المنطقة المنصهرة مما يؤدي إلى اتساع البركة المنصهرة .
- $\frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$ يكون تدفق مارانجوني موجب في حالة وجود عناصر فعالة مثل الكبريت والأكسجين [58]. حيث تنتقل المادة من حواف البركة المنصهرة إلى المركز الساخن أي انتشار إلى الداخل؛ كما يوضحه الشكل 26.



الشكل 25. تأثير تدرج توتر السطح أو تأثير مارانجوني [57].

4- نمذجة المصدر الحراري

تعد نمذجة المصدر الحراري لطاقة الليزر خطوة مهمة لتحقيق محاكاة دقيقة للظاهرة، ويمكن تمييز شكلين لمصدر الحراري هما مصدر الحرارة السطحي و الحجمي كما ذكرنا سابقاً في الفصل الأول.

في نموذجنا، اعتمدنا على التوزيع السطحي لمصدر الحراري بوحدة W/m^2 في حالة توزيع غاوسي المحدود على قرص نصف قطره R_s . حيث يصل تدفق الحرارة إلى أقصى كثافة له في الجزء المركزي الساخن، ثم يتناقص تدريجياً حتى نصف القطر المحدد، أين تنعدم طاقة المصدر الحراري وفق العبارة الآتية [46]:

$$Q_s(r, \theta, t) = \begin{cases} Q_m \exp\left(\frac{-r^2}{R_s^2}\right) & r \leq 2R_s \\ 0 & r > 2R_s \end{cases} \quad (II.4)$$

$Q_s(r, \theta, t)$ هو التوزيع السطحي عند $z = 0$ ، Q_m هو إجمالي طاقة الليزر.

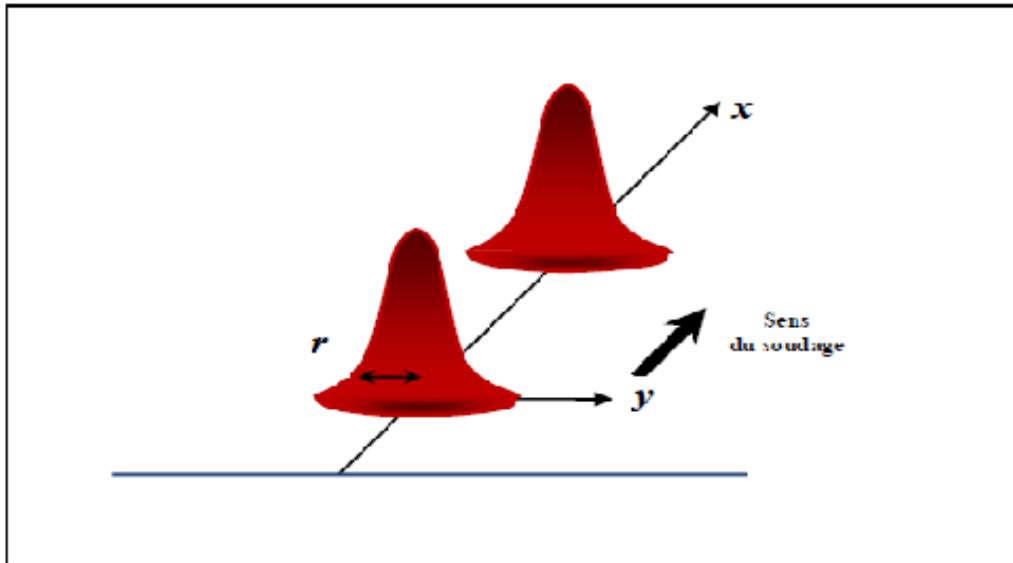
حيث أن :

$$r^2(t) = y^2 + (x - Vt)^2 \quad (II.5)$$

و من أجل :

$$\begin{aligned} r = R_s: Q(R_s, t) &= \exp(-1) Q_m = 0.37Q_m \\ r = 2R_s: Q(2R_s, t) &= \exp(-4) Q_m = 0.02Q_m \end{aligned}$$

يتم توزيع الطاقة عملياً حول R_s وفق الشكل 27.



الشكل 26: توزيع كثافة تدفق الطاقة على السطح [46].

5- النمذجة الرياضي

في الفصل الأول رأينا معادلات الحفظ التي تتحكم في تدفق المائع بشكل عام. وهي معادلات إنحفاظ الطاقة و كمية الحركة و الاستمرارية وفي هذا الفصل سوف نسقطها على نموذجنا والفرضيات التي أخذناها من أجل إيجاد التوزيع الحراري و السرعة في بركة اللحام للمادة، وتحديد حجم بركة اللحام على المرحلتين الصلبة والسائلة، باعتبار أن الشكل متمائل على نصفي سبيكة المغنيزيوم في هذا النموذج المدروس. المعادلات سابقة الذكر معطاة في النظام المرجعي المحمول المرتبط بقطعة العمل [49, 59]. تم شرحها في الصيغ التالية:

5-1- معادلة انحفاظ الطاقة

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T(r,z,\theta,t)}{\partial t} + (u - V_w) \frac{\partial T(r,z,\theta,t)}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z,\theta,t)}{\partial \theta} + w \frac{\partial T(r,z,\theta,t)}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(r,z,\theta,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z,\theta,t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(r,z,\theta,t)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T(r,z,\theta,t)}{\partial z^2} \right) + Q(r, z, \theta, t) - \frac{\partial(\rho u \Delta H)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v \Delta H)}{\partial \theta} - \frac{\partial(\rho w \Delta H)}{\partial z} \quad (\text{II.6})$$

5-2- معادلة الاستمرارية

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{II.7})$$

5-3- معادلة انحفاظ كمية الحركة

➤ على المحور r

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{(u-V_w)}{K} \right) \quad (\text{II.8})$$

➤ على المحور z

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{w}{k} \right) + \rho g \beta (T - T_{ref}) \quad (\text{II.9})$$

➤ على المحور θ

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{v}{K} \right) \quad (\text{II.10})$$

حيث K . يمثل النفاذية لجزء حجم السائل عبر معادلة كورين-كارمان [60]:

$$\frac{1}{K} = \frac{D(1-f_l)^2}{f_l^3} \quad (\text{II.11})$$

D هو ثابت متعلق بمورفولوجية المنطقة اللينة وقيمتها هي 10^{10}m^{-2} . و f_l هو الجزء السائل ويعطي بالعلاقة التالية:

$$f_l = \begin{cases} 0, & 0 < T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_1-T_s}, & T_s < T < T_1 \\ 1, & T > T_1 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

4-5 - دراسة وحساب تغير الطور

يوفر شعاع الليزر طاقة عالية تصل $10^6 \text{ W}^2/\text{m}$ ، وهذه الطاقة تخلق بركة من الاندماج بين السبيكتين الملحومتين؛ تنتقل الحرارة عن طريق التوصيل و الحمل الحراري. يتم التدفق الحراري عند الحدود السائلة-الصلبة، أي من الجزء السائل إلى الجزء الصلب ، والذي يخضع لانقطاع يساوي الحرارة الكامنة لتغير الطور.

لدراسة انتقال الطور من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة، نستخدم T_s و T_1 الحد الأدنى والأقصى لدرجات حرارة الانصهار T_f للسبيكة على التوالي. يتم حساب التدفق الحراري أو تراكم الطاقة باستخدام المعادلة التالية:

$$d\phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \overrightarrow{dS} + Q(r, \theta, z, t) \cdot dS \cdot dt \quad (\text{II.13})$$

➤ نحسب تدفق الطاقة $d\phi$.

➤ نحسب النسبة بين تدفق الحرارة و المحتوى الحراري للانصهار (الحرارة الكامنة) $(d\phi/\Delta H_{\text{fus}}) \Delta H_{\text{fus}}$.

- إذا كانت النسبة أكبر تماماً من الواحد (1) والتدفق أكبر تماماً من الصفر فانه تحسب الحرارة في المرحلة السائلة.
- إذا كانت النسبة أكبر تماماً من الواحد (1) والتدفق أقل تماماً من الصفر فانه تحسب الحرارة في المرحلة الصلبة.
- إذا كانت النسبة أقل تماماً من الواحد (1) فانه تحسب الحرارة في حالة تغير الطور الصلب / السائل.

6- النموذج العددي

نظراً لعدم وجود حلول تحليلية حتى الآن للمعادلات التفاضلية ((II. (6.7.8.9.10.13)). نلجأ لحلها بالطرق العددية، حيث يمكن أن تعطي الصيغ الرياضية (طريقة العناصر المنتهية، الفروق المنتهية، طريقة الحجم المنتهية) للمقادير الفيزيائية التي نحن بصدد حسابها (درجة الحرارة، السرعة) في كل نقطة من الفضاء؛ الحلول التقريبية لهذه الظواهر. الطريقة المستخدمة في بحثنا هي طريقة الحجم المنتهية لأنها الأنسب لتجسيد الظاهرة بشكل أكبر.

تمر طريقة الحجم المنتهية بمرحلتين رئيسيتين [61]:

➤ تجزئة مجال المحاكاة:

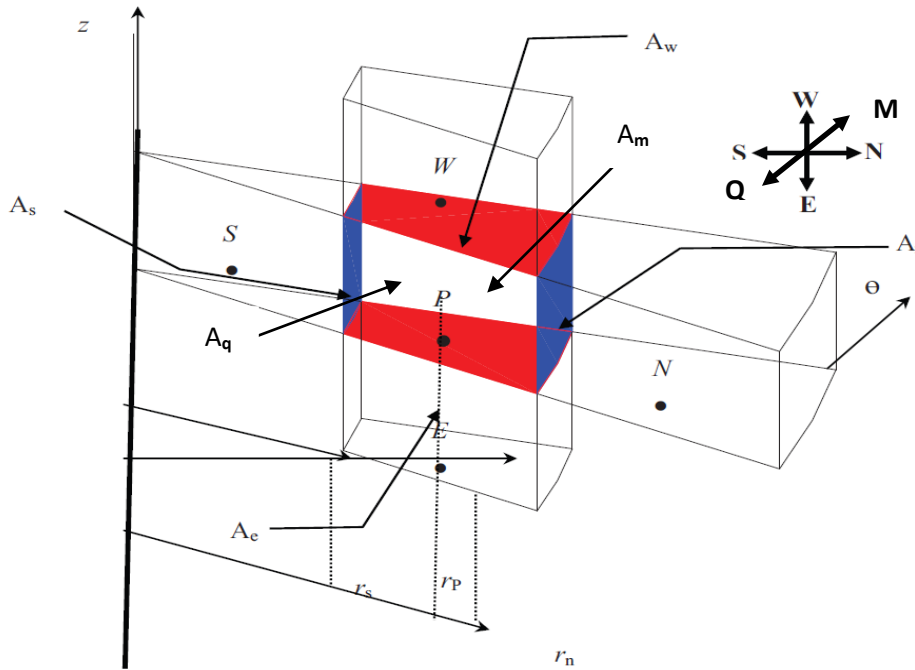
في هذه المرحلة يتم تقسيم مجال المحاكاة إلى عدد كبير و منته من الحجم العنصرية. في هذه الدراسة إعتدنا الحجم العنصرية ذات تقسيم منتظم.

➤ مكاملة المعادلات:

يتم فيها مكاملة المعادلات تدفق المائع في بركة اللحام في كل حجم من هذه الحجم العنصرية.

1-6- تجزئة مجال المحاكاة:

نذكر أن مجال الدراسة في هذه الحالة عبارة عن شكل اسطواني، والتقسيم يكون في الأبعاد (z, r, θ) حيث يعطي عددا منتهيا من عناصر الحجم كما هو موضح في الشكل 28:



الشكل 27: الحجم العنصري في الفضاء.

✓ تشير i للتقسيم وفق المحور r الذي يجزئ إلى i_{max} عقدة، و نعرف خطوة الانتقال من نقطة لأخرى بـ:

$$\Delta r = \frac{R}{i_{max}-1} \quad (II.14)$$

$$r(i) = (i - 1)\Delta r \quad (II.15)$$

✓ تشير j للتقسيم وفق المحور Z الذي يجزئ إلى j_{max} عقدة، ونعرف خطوة الانتقال من نقطة لأخرى بـ:

$$\Delta z = \frac{Z}{j_{max}-1} \quad (II.16)$$

$$z(j) = (j - 1)\Delta z \quad (II.17)$$

✓ تشير k للتقسيم وفق المحور θ الذي يجزئ إلى k_{max} عقدة، ونعرف خطوة الانتقال من نقطة لأخرى بـ:

$$\Delta \theta = \frac{\theta}{k_{max}-1} \quad (II.18)$$

$$\theta(k) = (k - 1)\Delta \theta \quad (II.19)$$

✓ حساب السطوح:

من اجل الحجم العنصري الاسطواني كما توضحه الشكل 4, يمكن تحديد ستة أوجه كالآتي:

$$A_n = r_n \cdot \Delta \theta \cdot \Delta z \quad (II.20)$$

$$A_s = r_s \cdot \Delta \theta \cdot \Delta z \quad (II.21)$$

$$A_e = A_w = r_p \cdot \Delta \theta \cdot \Delta r \quad (II.22)$$

$$A_q = A_m = \Delta z \cdot \Delta r \quad (II.23)$$

6-2- مكاملة المعادلات في المجالات العنصرية:

نعرف عنصر الحجم في الإحداثيات الأسطوانية كما يلي:

$$dV = r dr dz d\theta \quad (II.24)$$

وقبل البداية في تطبيق طريقة الحجوم المنتهية سنتطرق لتعريف المشتقات و الدوال الأصلية بواسطة هذه الطريقة و التي تعطى

بـ:

$$\int_P \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r} \right) dr = \left[r \frac{\partial f}{\partial r} \right]_w^e \quad (II.25)$$

$$\int_P \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) dz = [f]_s^n \quad (II.26)$$

$$\int_P \frac{\partial}{\partial z} \left(f \frac{\partial g}{\partial z} \right) dz = \left[f \frac{\partial g}{\partial z} \right]_s^n = \left[f|_n \frac{\partial g}{\partial z} \right]_n - \left[f|_s \frac{\partial g}{\partial z} \right]_s \quad (II.27)$$

$$\int_P \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) dz = \left[\frac{\partial f}{\partial z} \right]_S^n \quad (\text{II.28})$$

$$\int_P f \frac{\partial g}{\partial z} dz = f_P \left(\frac{g_N - g_S}{2\delta z} \right) \quad (\text{II.29})$$

$$\left[r \frac{\partial f}{\partial r} \right]_W^e = \left[r \frac{\partial f}{\partial r} \right]_e - r \frac{\partial f}{\partial r} \Big|_W \quad (\text{II.30})$$

$$\frac{\partial f}{\partial r} \Big|_e = \frac{f|_E - f|_P}{\delta r} \quad (\text{II.31})$$

$$f|_S = \frac{f|_P + f|_S}{2} \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} \Big|_n = \frac{f|_N - f|_P}{\delta z} \quad (\text{II.33})$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} \Big|_s = \frac{f|_P - f|_S}{\delta z} \quad (\text{II.34})$$

$$f|_n = \frac{f|_N + f|_P}{2} \quad (\text{II.35})$$

حيث النقاط P, S, N, W, E, Q, M, s, n, w, q, m, e بعد تجزئة مجال المحاكاة واختيار الحجم العنصري مباشر في مكاملة معادلات (II.(6.7.8.9.10.13)). بتطبيق تعريف المشتقات الجزئية و الدوال الأصلية بطريقة الحجم المنتهية، باستعمال نشر تايلور ل W_x ($x=e, w, n, s, m, q$) من الدرجة الثانية من أجل تقريب السرعة إلى مركز السطح، هذا التقريب يعطي (Schéma aux Différences Centrées CDS) نصوغ المعادلات التفاضلية للدرجة الحرارة، السرعة و تغير الطور في الحالة الصلبة والسائلة بالعبارات التالية: [41, 62].

6-2-1- في الحالة الصلبة:

أ- معادلة انحفاظ كمية الحركة:

➤ على المحور z :

$$\begin{aligned} \rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{w}{k} \right) + \rho_s g \beta (T \\ - T_{ref}) \end{aligned}$$

بعد المكملمة وتبسيط نحصل على المعادلة التالية:

$$w_p^n - \beta_1 = \alpha_1 w_N^{n+1} + \alpha_2 w_p^{n+1} + \alpha_3 w_S^{n+1} \quad (\text{II.36})$$

حيث أن:

$$\alpha_1 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_n}{2} - D_z + D_n \right)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{C_t} \left(D_e - D_w - D_n - D_s - D_m - D_q - \frac{1}{2} (C_e - C_w + C_n - C_s - D_m - D_q) + \Delta V \frac{\mu}{k} - C_t \right)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_s}{2} + D_z + D_s \right)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{C_t} \left(\left(\frac{C_e}{2} + D_e \right) w_E^{n+1} + \left(\frac{C_w}{2} + D_w \right) w_W^{n+1} + \left(\frac{C_m}{2} + D_m \right) w_M^{n+1} + \left(\frac{C_q}{2} + D_q \right) w_Q^{n+1} + \frac{A_e}{2} P_E^{n+1} - \frac{A_w}{2} P_W^{n+1} - \Delta V \rho g \beta (T_p^{n+1} - T_{ref}) \right)$$

على المحور r : ➤

بنفس الطريقة نكمل ونبسط المعادلة الحركة على المحور r فنحصل على المعادلة التالية:

$$\rho_s \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{(u - V_w)}{K} \right)$$

$$u_p^n - \beta_2 = \alpha_4 u_N^{n+1} + \alpha_5 u_p^{n+1} + \alpha_6 u_S^{n+1} \quad (\text{II.37})$$

حيث أن:

$$\alpha_4 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_n}{2} + D_n \right)$$

$$\alpha_5 = -\frac{1}{C_t}(D_e + D_w + D_n + D_s + D_m + D_q + \frac{1}{2}(-C_e + C_w - C_n + C_s + D_m + D_q) - \Delta V \frac{\mu}{k} V_W + C_t)$$

$$\alpha_6 = \frac{1}{C_t}(\frac{C_s}{2} + D_s)$$

$$\beta_2 = -\frac{1}{C_t} \left(\left(-\frac{C_n}{2} + D_z - D_n \right) u_E^n + \left(-\frac{C_s}{2} - D_z - D_s \right) u_W^n + \left(-\frac{C_m}{2} - D_m \right) u_M^n + \left(-\frac{C_q}{2} - D_q \right) u_Q^n - \frac{A_n}{2} P_{N_E}^n + \frac{A_s}{2} P_S^n \right)$$

ب- معادلة الاستمرارية :

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \rho_s \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

بمكاملة وتبسيط معادلة الاستمرارية من أجل الحصول على معادلة السرعة على المحور θ :

$$v_Q^n = -\alpha_7 u_N^{n+1} - \alpha_8 u_p^{n+1} + \alpha_9 u_S^{n+1} - \alpha_{10} (w_E^{n+1} - w_W^{n+1}) + v_M^{n+1} \quad (\text{II.38})$$

حيث أن

$$\alpha_7 = \frac{2 r_p A_n}{A_q} \frac{1}{2}$$

$$\alpha_8 = \frac{2 r_p}{A_q} \left(\frac{A_n}{2} - \frac{A_s}{2} \right)$$

$$\alpha_9 = \frac{2 r_p A_s}{A_q} \frac{1}{2}$$

$$\alpha_{10} = \frac{2 r_p A_e}{A_q} \frac{1}{2}$$

ت - معادلة الطاقة:

بعد المكملة وتبسيط نحصل على المعادلة التالية:

$$\begin{aligned}
 & \rho_s C p_s \left(\frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial t} + (u - V_w) \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial \theta} \right. \\
 & \quad \left. + w \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial z} \right) \\
 & = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T(r, z, \theta, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(r, z, \theta, t)}{\partial \theta^2} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 T(r, z, \theta, t)}{\partial z^2} \right) + Q(r, z, \theta, t) - \frac{\partial(\rho_s u \Delta H)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_s v \Delta H)}{\partial \theta} \\
 & \quad - \frac{\partial(\rho_s w \Delta H)}{\partial z}
 \end{aligned}$$

$$T_p^n - \beta_3 = \alpha_{11} T_N^{n+1} + \alpha_{12} T_P^{n+1} + \alpha_{13} T_S^{n+1} \quad (\text{II.39})$$

حيث أن:

$$\alpha_{11} = \frac{\Delta t}{\rho_s C p_s \Delta V} \left(\frac{\rho_s C p_s A_n u_n}{2} - \frac{\rho_s C p_s A_n V_w}{2} + \frac{\lambda_s A_n}{\Delta r} \right)$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{12} = & \frac{\Delta t}{\rho_s C p_s \Delta V} \left(\frac{\rho_s C p_s A_n u_n}{2} - \frac{\rho_s C p_s A_s u_s}{2} - \frac{\rho_s C p_s A_n V_w}{2} + \frac{\rho_s C p_s A_s V_w}{2} \right. \\
 & + \frac{\rho_s C p_s A_e w_e}{2} + \frac{\rho_s C p_s A_w w_w}{2} - \frac{\lambda_s A_n}{\Delta r} - \frac{\lambda_s A_s}{\Delta r} - 2 \cdot \frac{\lambda_s A_e}{\Delta z} \\
 & \left. + \frac{\rho_s C p_s \Delta V}{\Delta t} \right)
 \end{aligned}$$

$$\alpha_{13} = \frac{\Delta t}{\rho_s C p_s \Delta V} \left(-\frac{\rho_s C p_s A_s u_s}{2} + \frac{\rho_s C p_s A_s V_w}{2} + \frac{\lambda_s A_s}{\Delta r} \right)$$

$$\begin{aligned}
 \beta_3 = & \frac{\Delta t}{\rho_s C p_s \Delta V} \left(\left(\frac{\rho_s C p_s A_e w_e}{2} + \frac{\lambda_s A_e}{\Delta z} \right) T_E^n + \left(-\frac{\rho_s C p_s A_w w_w}{2} + \frac{\lambda_s A_w}{\Delta z} \right) T_w^n \right. \\
 & \left. - \Delta V Q_p^n \right)
 \end{aligned}$$

ث- دراسة وحساب تغير الطور

بعد حساب التدفق الحراري على الأوجه في شكل 4 وتبسيطها نحصل على المعادلة التالية:

$$d\phi = -\lambda_s \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \overrightarrow{dS} + Q(r, \theta, z, t) \cdot dS \cdot dt$$

$$d\phi = \alpha_{14} T_N^{n+1} + (\alpha_{14} - \alpha_{15}) T_P^{n+1} - \alpha_{15} T_S^{n+1} + \alpha_{16} (T_Q^{n+1} - T_M^{n+1}) + \alpha_{17} (T_W^{n+1} - T_E^{n+1}) + \beta_4 \quad (\text{II.40})$$

حيث أن

$$\alpha_{14} = \lambda_s \frac{A_n}{\Delta r}$$

$$\alpha_{15} = \lambda_s \frac{A_s}{\Delta r}$$

$$\alpha_{16} = \lambda_s \frac{A_q}{\Delta \theta}$$

$$\alpha_{17} = \lambda_s \frac{A_e}{\Delta z}$$

$$\beta_4 = Q_p \Delta S$$

6-2-2- في الحالة السائلة:

أ- معادلة انحفاظ كمية الحركة:

➤ على المحور z :

$$\begin{aligned} \rho_l \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{w}{k} \right) + \rho_l g \beta (T \\ - T_{ref}) \end{aligned}$$

بعد مكاملة تبسيط المعادلة السابقة نكتب

$$w_p^n - \varepsilon_1 = \gamma_1 w_N^{n+1} + \gamma_2 w_p^{n+1} + \gamma_3 w_S^{n+1} \quad (\text{II.41})$$

حيث أن:

$$\gamma_1 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_n}{2} - D_z + D_n \right)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{C_t} \left(D_e - D_w - D_n - D_s - D_m - D_q - \frac{1}{2} (C_e - C_w + C_n - C_s - D_m - D_q) + \Delta V \frac{\mu}{k} - C_t \right)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_s}{2} + D_z + D_s \right)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \frac{1}{C_t} & \left(\left(\frac{C_e}{2} + D_e \right) w_E^{n+1} + \left(\frac{C_w}{2} + D_w \right) w_W^{n+1} + \left(\frac{C_m}{2} + D_m \right) w_M^{n+1} \right. \\ & \left. + \left(\frac{C_q}{2} + D_q \right) w_Q^{n+1} + \frac{A_e}{2} P_E^{n+1} - \frac{A_w}{2} P_W^{n+1} - \Delta V \rho_l g \beta (T_p^{n+1} - T_{ref}) \right) \end{aligned}$$

على المحور r : ➤

بنفس الطريقة نكامل ونبسط المعادلة الحركة على المحور θ فنحصل على المعادلة التالية:

$$\begin{aligned} \rho_l \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{(u - V_w)}{K} \right) \end{aligned}$$

$$u_p^n - \varepsilon_2 = \gamma_4 u_N^{n+1} + \gamma_5 u_p^{n+1} + \gamma_6 u_S^{n+1} \quad (\text{II.42})$$

حيث أن: ➤

$$\gamma_4 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_n}{2} + D_n \right)$$

$$\begin{aligned} \gamma_5 = - \frac{1}{C_t} & \left(D_e + D_w + D_n + D_s + D_m + D_q + \frac{1}{2} (-C_e + C_w - C_n + C_s + D_m \right. \\ & \left. + D_q) - \Delta V \frac{\mu}{k} V_w + C_t \right) \end{aligned}$$

$$\gamma_6 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_s}{2} + D_s \right)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{1}{C_t} \left(\left(-\frac{C_n}{2} + D_z - D_n \right) u_E^n + \left(-\frac{C_s}{2} - D_z - D_s \right) u_W^n + \left(-\frac{C_m}{2} - D_m \right) u_M^n + \left(-\frac{C_q}{2} - D_q \right) u_Q^n - \frac{A_n}{2} P_{N_E}^n + \frac{A_s}{2} P_S^n \right)$$

ب- معادلة الطاقة:

$$\begin{aligned} \rho_l C p_l \left(\frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial t} + (u - V_w) \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial \theta} + w \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial z} \right) \\ = \lambda_l \left(\frac{\partial^2 T(r, z, \theta, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \theta, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(r, z, \theta, t)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T(r, z, \theta, t)}{\partial z^2} \right) + Q(r, z, \theta, t) - \frac{\partial(\rho_l u \Delta H)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_l v \Delta H)}{\partial \theta} - \frac{\partial(\rho_l w \Delta H)}{\partial z} \end{aligned}$$

بعد مكاملة تبسيط المعادلة السابقة نجد

$$T_p^n - \varepsilon_3 = \gamma_7 T_N^{n+1} + \gamma_8 T_P^{n+1} + \gamma_9 T_S^{n+1} \quad (\text{II.43})$$

حيث أن:

$$\gamma_7 = \frac{\Delta t}{\rho_l C p_l \Delta V} \left(\frac{\rho_l C p_l A_n u_n}{2} - \frac{\rho_l C p_l A_n V_w}{2} + \frac{\lambda_l A_n}{\Delta r} \right)$$

$$\begin{aligned} \gamma_8 = \frac{\Delta t}{\rho_l C p_l \Delta V} \left(\frac{\rho_l C p_l A_n u_n}{2} - \frac{\rho_l C p_l A_s u_s}{2} - \frac{\rho_l C p_l A_n V_w}{2} + \frac{\rho_l C p_l A_s V_w}{2} + \frac{\rho_l C p_l A_e w_e}{2} + \frac{\rho_l C p_l A_w w_w}{2} - \frac{\lambda_l A_n}{\Delta r} - \frac{\lambda_l A_s}{\Delta r} - 2 \cdot \frac{\lambda_l A_e}{\Delta z} + \frac{\rho_l C p_l \Delta V}{\Delta t} \right) \end{aligned}$$

$$\gamma_9 = \frac{\Delta t}{\rho_l C p_l \Delta V} \left(-\frac{\rho_l C p_l A_s u_s}{2} + \frac{\rho_l C p_l A_s V_w}{2} + \frac{\lambda_l A_s}{\Delta r} \right)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta t}{\rho_l C p_l \Delta V} \left(\left(\frac{\rho_l C p_l A_e w_e}{2} + \frac{\lambda_l A_e}{\Delta z} \right) T_E^n + \left(-\frac{\rho_l C p_l A_w w_w}{2} + \frac{\lambda_l A_w}{\Delta z} \right) T_W^n - \Delta V Q_p^n \right)$$

ت- دراسة وحساب تغير الطور

$$d\varphi = -\lambda_l \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \overrightarrow{dS} + Q(r, \theta, z, t) \cdot dS \cdot dt$$

$$d\varphi = \gamma_{14} T_N^{n+1} + (\gamma_{14} - \gamma_{15}) T_P^{n+1} - \gamma_{15} T_S^{n+1} + \gamma_{16} (T_Q^{n+1} - T_M^{n+1}) + \gamma_{17} (T_W^{n+1} - T_E^{n+1}) + \beta_4 \quad (\text{II.44})$$

حيث أن

$$\gamma_{14} = \lambda_l \frac{A_n}{\Delta r}$$

$$\gamma_{15} = \lambda_l \frac{A_s}{\Delta r}$$

$$\gamma_{16} = \lambda_l \frac{A_q}{\Delta \theta}$$

$$\gamma_{17} = \lambda_l \frac{A_e}{\Delta z}$$

$$\varepsilon_4 = Q_P \Delta S$$

بعد استبدال المعادلات التفاضلية الجزئية ((6.7.8.9.10.13)) II. بمعادلات مكافئة لها في المرحلتين الصلبة و السائلة

II. ((36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44)) متقاربة في الزمان والمكان. بوضع كل نقطة من

الإحداثيات بما يقابلها من القيم:

$$N = i + 1, S = i - 1, P = i, E = j + 1, W = j - 1, Q = k - 1, M = k + 1$$

يمكن كتابة المعادلات II. ((36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44)) على النحو التالي:

➤ في الحالة الصلبة:

$$w_{(i,j,k)}^n - \beta_{1ijk} = \alpha_{1ijk} w_{(i+1,j,k)}^{n+1} + \alpha_{2ijk} w_{(i,j,k)}^{n+1} + \alpha_{3ijk} w_{(i-1,j,k)}^{n+1}$$

$$u_{(i,j,k)}^n = \alpha_4 u_{(i+1,j,k)}^{n+1} + \alpha_5 u_{(i,j,k)}^{n+1} + \alpha_6 u_{(i-1,j,k)}^{n+1} + \varepsilon_2$$

$$\begin{aligned}
 v_{(i,j,k)}^n &= -\alpha_7 u_{(i+1,j,k)}^{n+1} + \alpha_8 u_{(i-1,j,k)}^{n+1} \\
 &\quad - \alpha_9 (w_{(i,j+1,k)}^{n+1} - w_{(i,j-1,k)}^{n+1}) + v_{(i,j,k-1)}^{n+1} \\
 T_{(i,j,k)}^n - \beta_{3ijk} &= \alpha_{10ijk} T_{(i+1,j,k)}^{n+1} + \alpha_{11ijk} T_{(i,j,k)}^{n+1} + \alpha_{12ijk} T_{(i-1,j,k)}^{n+1} \\
 d\varphi &= \alpha_{14ijk} T_{(i+1,j,k)}^{n+1} + (\alpha_{14ijk} - \alpha_{15ijk}) T_{(i,j,k)}^{n+1} - \alpha_{15ijk} T_{(i-1,j,k)}^{n+1} \\
 &\quad + \alpha_{16ijk} (T_{(i,j,k-1)}^{n+1} - T_{(i,j,k+1)}^{n+1}) + \alpha_{17ijk} (T_{(i,j-1,k)}^{n+1} \\
 &\quad - T_{(i,j+1,k)}^{n+1}) + \beta_{4ijk}
 \end{aligned}$$

➤ في الحالة السائلة:

$$\begin{aligned}
 w_{(i,j,k)}^n - \varepsilon_{1ijk} &= \gamma_{1ijk} w_{(i+1,j,k)}^{n+1} + \gamma_{2ijk} w_{(i,j,k)}^{n+1} + \gamma_{3ijk} w_{(i-1,j,k)}^{n+1} \\
 u_{(i,j,k)}^n &= \gamma_4 u_{(i+1,j,k)}^{n+1} + \gamma_5 u_{(i,j,k)}^{n+1} + \gamma_6 u_{(i-1,j,k)}^{n+1} + \varepsilon_2 \\
 T_{(i,j,k)}^n - \varepsilon_{3ijk} &= \gamma_{7ijk} T_{(i+1,j,k)}^{n+1} + \gamma_{8ijk} T_{(i,j,k)}^{n+1} + \gamma_{9ijk} T_{(i-1,j,k)}^{n+1} \\
 d\varphi &= \gamma_{14ijk} T_{(i+1,j,k)}^{n+1} + (\gamma_{14ijk} - \gamma_{15ijk}) T_{(i,j,k)}^{n+1} - \gamma_{15ijk} T_{(i-1,j,k)}^{n+1} \\
 &\quad + \gamma_{16ijk} (T_{(i,j,k-1)}^{n+1} - T_{(i,j,k+1)}^{n+1}) + \gamma_{17ijk} (T_{(i,j-1,k)}^{n+1} \\
 &\quad - T_{(i,j+1,k)}^{n+1}) + \varepsilon_{4ijk}
 \end{aligned}$$

المتغيرات $\beta_{(1\dots4)ijk}$ ، $\alpha_{(1\dots17)ijk}$ ، $\varepsilon_{(1\dots4)ijk}$ ، $\gamma_{(1\dots17)ijk}$ هي بدلالة الخصائص الفيزيائية و العددية للنظام في الخطوتين الزمنيتين n ، $n+1$

7- الشروط الابتدائية و الشروط الحدية

7-1 الشروط الابتدائية و الحدية بالنسبة لسرعة

أ- الشروط الحدية والابتدائية لسرعات على سطح سبيكة؛ من أجل الموضع $Z = 0$ ($J=1$) و مختلف قيم θ ، r تعطى:

$$\diamond \text{ من أجل } \theta = 0, \theta = \theta_{max}$$

$$\triangleright r = 0, r = r_{max}$$

تكون السرعات معدومة و تغير في السرعة القطرية بطيء ويقارب الصفر، أي

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, v = 0, w = 0$$

$$0 < r < rmax \quad \blacktriangleright$$

تكون السرعات معدومة باستثناء السرعة القطرية، أي

$$u(i, j, k), v = 0, w = 0$$

$$0 < \theta < \theta max \quad \blacklozenge$$

$$r = 0, r = rmax \quad \blacktriangleright$$

تكون السرعة المحورية معدومة و تغير في السرعة القطرية و الزاوية بطيء ويقارب الصفر، أي

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, \frac{\partial v}{\partial r} = 0, w = 0$$

$$0 < r < rmax \quad \blacktriangleright$$

تكون السرعة المحورية معدومة باستثناء السرعة القطرية و الزاوية، أي

$$u(i, j, k), v(i, j, k), w = 0$$

في المنطقة السائلة أين يكون حمل مارانجوني أو التدرج في توتر السطح معطي بالعبارات التالية [48]:

$$-\mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}, -\mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \theta}, w = 0$$

ب- الشروط الحدية والابتدائية لسرعات وسط سبيكة من أجل المواضع $(J=2, jmax-1)z$ و مختلف قيم θ ، r تعطي:

$$\theta = 0 \quad \blacklozenge$$

$$r = 0, r = rmax \quad \blacktriangleright$$

تكون السرعة الزاوية معدومة و تغير في السرعة القطرية و المحورية بطيء ويقارب الصفر، أي

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, v = 0, \frac{\partial w}{\partial r}$$

$$0 < r < rmax \quad \blacktriangleright$$

تكون السرعة الزاوية معدومة باستثناء السرعة القطرية و المحورية، أي

$$u(i, j, k), v = 0, w(i, j, k)$$

$$0 < \theta < \theta_{max} \quad \blacklozenge$$

$$r = 0, r = r_{max} \quad \blacktriangleright$$

تكون تغيرات مركبات السرعة بطيئة وتقارب الصفر، أي

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, \frac{\partial v}{\partial r} = 0, \frac{\partial w}{\partial r} = 0$$

$$0 < r < r_{max} \quad \blacktriangleright$$

تكون كل مركبات السرعة محسوبة، أي

$$u(i, j, k), v(i, j, k), w(i, j, k)$$

$$\theta = \theta_{max} \quad \blacklozenge$$

$$r = 0, r = r_{max} \quad \blacktriangleright$$

تكون السرعة الزاوية معدومة و تغير في السرعة القطرية و المحورية بطيء ويقارب الصفر، أي

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, v = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$0 < r < r_{max} \quad \blacktriangleright$$

تكون السرعة الزاوية معدومة باستثناء السرعة القطرية و المحورية، أي

$$u(i, j, k), v = 0, w(i, j, k)$$

ت- الشروط الحدية و الابتدائية لسرعات في آخر عمق لسبيكة من أجل الموضع z_{max} ($J=j_{max}$) و لمختلف قيم r, θ تعطي:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

مختلف مشتقات مركبات السرعة المائع بطيئة وتقارب الصفر أي أن قيم $z_{max} - 1$ لسرعات تساوي قيم z_{max}

2-7- الشروط الابتدائية و الحدية بالنسبة لدرجة الحرارة

أ- الشروط الحدية و الابتدائية لدرجة الحرارة على سطح سبيكة؛ من اجل الموضع $z = 0$ ($J=1$) و مختلف قيم r, θ تعطي:

$$0 \leq \theta \leq \theta_{max} \quad \blacklozenge$$

$$r = 0 \quad \blacktriangleright$$

في هذا الموضع نعتبر أن الحجم العنصري على شكل اسطوانة أي أن تدفق الحرارة يعطي بعلاقة التالية:

$$d\phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \overrightarrow{dS} + Q(r, \theta, z, t) \cdot dS \cdot dt$$

$$0 < r < r_{max} \quad \blacktriangleright$$

تحسب درجة الحرارة بمعادلة انحفاظ الطاقة، أي

$$\rho C_p V \text{grad}T = \lambda \text{div}T + Q - \rho V \text{grad}\Delta H$$

$$r = r_{max} \quad \blacktriangleright$$

يكون التغير في درجة الحرارة بطيء ويقارب الصفر عند نهاية الصفيحة، أي

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

ب- الشروط الحدية و الابتدائية لدرجات الحرارة في وسط سبيكة من أجل الموضع z ($J=2, j_{max}-1$) و مختلف قيم r, θ تعطي:

$$0 \leq \theta \leq \theta_{max} \quad \blacklozenge$$

$$r = 0 \quad \blacktriangleright$$

نعيد علاقة التدفق الحراري السابقة ولكن بدون المصدر الحراري

$$d\phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \overrightarrow{dS}$$

$$0 < r < r_{max} \quad \blacktriangleright$$

نعيد معادلة انحفاظ الطاقة بدون المصدر الحراري، أي

$$\rho C_p V \text{grad}T = \lambda \text{div}T - \rho V \text{grad}\Delta H$$

$$r = r_{max} \quad \blacktriangleright$$

يكون التغير في درجة الحرارة بطيء ويقارب الصفر عند نهاية الصفيحة، أي

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

ت- الشروط الحدية و الابتدائية لدرجات الحرارة في آخر عمق لسبيكة من أجل الموضع z_{max} ($J=j_{max}$) و مختلف قيم r, θ تعطي:

مشتق درجة الحرارة بطيء ويقارب الصفر أي أن قيم $z_{max} - 1$ لدرجة الحرارة تساوي قيم z_{max} .

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

7-3- الشروط الابتدائية و الحدية بالنسبة لتغير الطور

أ- من أجل الموضع $r = 0$ ($i=1$) و مختلف قيم θ, z

نعتبر الحجم العنصري عبارة عن اسطوانة متناظرة، ونحسب التدفق على الأوجه الجانبية الاسطوانة باستخدام المعادلة التدفق

الحراري. (II.13)

ب- من أجل مختلف قيم r, θ, z

حساب التدفق الحراري على الأوجه في شكل 4 باستخدام المعادلة (II.13) و الحصول على المعادلة ((44 و (II.40) في

الحالتين الصلبة والسائلة.

ت- من أجل $r = r_{max}$ و مختلف قيم θ, z

يكون التغير في الطور بطيء ويقارب الصفر عند نهاية الصفيحة أي

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

8- برنامج الحساب:

يمثل الشكل 29 عملية بناء المخطط لحساب، توزيع درجة الحرارة والسرعة في بركة اللحام وكذلك تحديد أبعاد كل

مناطق اللحام حسب تضررها بدرجة الحرارة. قمنا بتقسيم سبيكة المعدن إلى شبكة منتظمة من الخلايا، حيث أن عدد الخلايا

في أبعاد سبيكة (2 mm 5 × mm × 10 mm) في حدود 20000 خلية. لبرمجة حل المعادلات السابقة الذكر

على نظام معادلات المصفوفة $A.X = B$ ؛ المصفوفات A ثلاثية الأضلاع. يتم استخدام خوارزمية Gauss-Seidel

التكرارية لحل أنظمة لمعادلات الثلاث بسهولة. نضع kg_{max} هو الحد الأقصى لعدد التكرارات للوصول إلى الخطأ النسبي

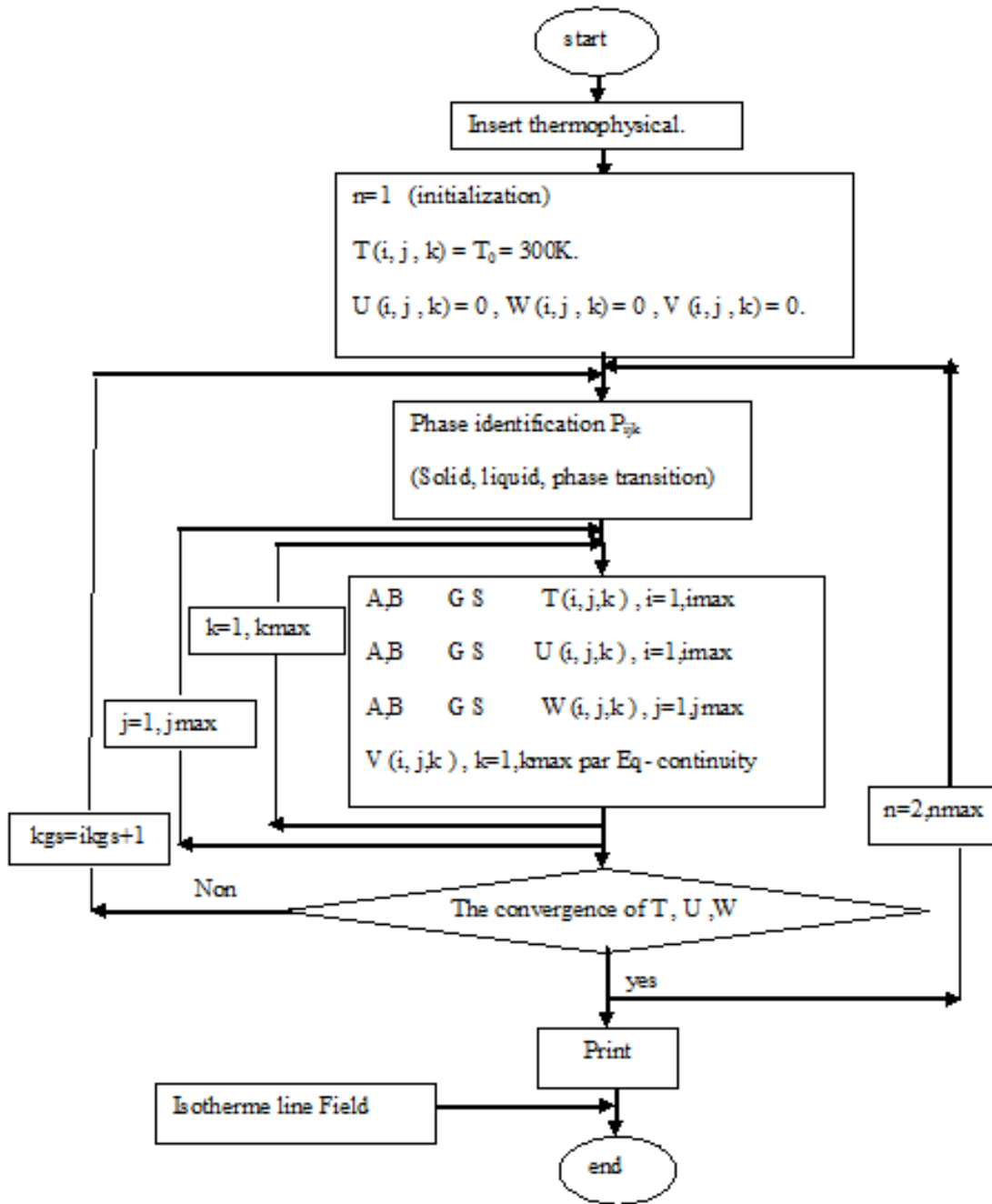
المطلوب في حساب X ($X=T, U, W$)، بعض التجارب العددية تجعل من الممكن الحصول على قيمة جيدة من

kg_{max} لتقارب الحلول X لجميع القيم i و j و k في الزمن $n + 1$.

يقدم اختبار البعد $imax$ لنظام المعادلة $B = A.X$ والحساب على الحلقات j_{max} و k_{max} مخططاً بسيطاً

للنمذجة. هذا المخطط لا يجد من الحلول. يوضح الشكل 29 مخطط النمذجة لدمج المعادلات التفاضلية المقترنة. لغة البرمجة

المستخدمة هي FORTRAN



الشكل 28: مخطط النمذجة لدمج المعادلات التفاضلية المقترنة [59].

الفصل III:

النتائج و المناقشة

الفصل III

النتائج والمناقشة

1- مقدمة

في هذا الفصل، سوف نقدم النتائج الرئيسية للنموذج العددي لدراسة لحم سبيكة من مزيج المغنيزيوم بشعاع ليزر Nd:YAG. ينبعث شعاع الليزر بشكل مستمر على المحور r للإحداثيات الاسطوانية. يعتمد الحصول على الحلول العددية للمعادلات التفاضلية السابقة على الحساب التكراري للوصول إلى حل أكثر دقة، وهذا ليس بالأمر الهين. يتطلب ذلك سرعة عالية في الحساب و ذاكرة تخزين عالية، وهذا يتجاوز حدود جهاز الكمبيوتر. لهذا لجأنا إلى المركز الحساب المكثف بالجامعة. ثم يتم استغلال نتائج النمذجة ومعالجتها على شكل منحنيات أو جداول لفهم تطور مجالات السرعة ودرجة الحرارة وما إلى ذلك.

2- شروط العملية

2-1- المعدن المستعمل

المعدن المستعمل في بحثنا هذا هو سبائك المغنيزيوم من نوع AZ91 (Mg - AL - Zn) كما ورد في الفصل الأول، حيث يتكون هذا الخليط من التركيب الكيميائي الموضح في الجدول 3.

الجدول 3: التركيب الكيميائي المتوسط لـ AZ91 [13]

| العناصر | AL | Zn | Mg | O | Mn | Cu | Fe | Ni | Si |
|------------|------|------|-------|------|----|----|------|----|----|
| القيمة (%) | 7.10 | 2.98 | 85.44 | 2.75 | | | 1.90 | | |

كما تتميز سبيكة المغنيزيوم AZ91 بالخصائص الفيزيائية و الميكانيكية الآتية:

2-1-1- الخصائص الفيزيائية لسبائك المغنيزيوم AZ91

تعتمد كفاءة عملية اللحام بالليزر على الخصائص الفيزيائية للمعدن الملحوم. المعدن الذي عملنا عليه في دراستنا هو سبائك المغنيزيوم AZ91، الذي يتميز بخصائص جيدة مثل انخفاض امتصاص أشعة الليزر، و قوة الأكسدة، الموصلية الحرارية العالية، معامل التمدد الحراري العالي، درجات حرارة الانصهار و الغليان المنخفضة، مجال واسع من درجة الحرارة للتصلب، لزوجة

منخفضة، انخفاض التوتر السطحي، وقابلية الذوبان العالية للهيدروجين في الحالة السائلة، وعدم تغير اللون عند درجة حرارة الانصهار [63]. كما يوضح الجدول 4 الخصائص الفيزيائية الرئيسية لخليط AZ91، المعطى في درجة الحرارة المحيط.

الجدول 4: الخصائص الفيزيائية لسبائك المغنيزيوم AZ91 [40].

| الخصائص | الترميز | القيمة |
|------------------------------|-------------|--|
| الكتلة الحجمية لطور الصلب | ρ | 1810(kg m ⁻³) |
| الحرارة النوعية لطور الصلب | Cp_s | 1020(J kg ⁻¹ K ⁻¹) |
| الناقلية الحرارية لطور الصلب | λ_s | 146(W m ⁻¹ K ⁻¹) |
| الناقلية الكهربائية | λ_e | 6.6 (Ms m ⁻¹) |
| درجة حرارة التجمد | T_s | 743(K) |
| درجة حرارة الذوبان | T_l | 868(K) |
| درجة حرارة الغليان | T_v | 1380(K) |
| معامل التوسع الحراري | β | 1.1x10 ⁻⁵ (K ⁻¹) |
| معامل الامتصاص | α | 0.3 |
| معامل التوتر السطحي | γ | -0.64x10 ⁻³ .(N K ⁻¹ m ⁻¹) |
| اللزوجة الديناميكية | μ | 1.72x10 ⁻⁵ (kg m ⁻¹ s ⁻¹) |
| حرارة الكامنة الانصهار | H_{fus} | 3.73x10 ⁵ (J kg ⁻¹) |

2-1-2- الخصائص الميكانيكية لسبائك المغنيزيوم AZ91

يعتبر خليط المغنيزيوم المدروس AZ91 وسيطاً جيداً بين المقاومة الميكانيكية و الصلابة و المقاومة الممتازة ضد التآكل، مما يجعله الأكثر استخداماً في كثير من المجالات (الصناعة الفضائية، السيارات، الالكترونيات ...). يوضح الجدول 5 الخصائص الميكانيكية الرئيسية للخليط AZ91 معطى في درجة الحرارة المحيط.

الجدول 5: الخصائص الميكانيكية لسبائك المغنيزيوم AZ91 [40]

| الخصائص | القيمة |
|---------------------------|------------|
| مقاومة الجر | 240 (MPa) |
| حد المرونة | 160 (MPa) |
| معامل يونج (Young) | 44.8 (MPa) |
| استطالة الكسر | 6 % |
| الارتدادية | 6 J |
| إجهاد (RxR Moore 5x10) | 97 (MPa) |
| استطاعة التلطيف | 25 % |
| نسبة السمك | 0.35 |
| صلابة روكويل (Rockwell E) | 75 |

2-2- تحديد متغيرات نمذجة لعملية اللحام بالليزر

تتأثر عملية اللحام بالليزر بالعديد من المتغيرات مثل التي ذكرناها في الفصل الأول. هذه المتغيرات تعمل على تحريك عملية اللحام ومن أهمها: السرعة اللحام، استطاعة الليزر، نوع الليزر، غار الحماية ونوع المعدن الملحوم. إن المتغيرات الرئيسية (السرعة اللحام و استطاعة الليزر) تؤثر بشكل كبير على تطور خصائص العملية مثل تغيير في درجة الحرارة وسرعة تدفق المائع و تحديد حدود المنطقة المنصهرة والتجويف البخاري الذي بدوره يكون نقل الطاقة فيه معقدًا بسبب العديد من الظواهر (الانعكاسات المتعددة، الضغط، امتصاص الشعاع بواسطة الأبخرة، وما إلى ذلك)؛ التي تؤثر بشكل كبير على هندسته وحجمه. وهي أيضًا من العوامل المناسبة للحام بسماكة معينة مما يسهل الوصول إلى عمق الاختراق وعرض اللحام المطلوب. عمق الاختراق وعرض اللحام هما العاملان الرئيسيان اللذان تم دراستهما في بحثنا.

من أجل إجراء عملية نمذجة للحام بالليزر والوصول إلى نموذج قادر على وصف بشكل صحيح لتوزيع درجة الحرارة وسرعة أثناء عملية اللحام وتحديد حجم البركة المنصهرة، قمنا بتحديد:

- موضع النقطة البؤرية: على سطح المعدن.
- طاقة الليزر P: من 700 W إلى 2000 W.
- سرعة اللحام V: من 10 nim/m إلى 1 nim/m .
- معدل تدفق غاز الحماية: الذي نعتبره معدوم في دراستنا.
- أبعاد قطعة العمل هي: $Z_{max} = 2 \text{ mm}$, $L_y = 2.5 \text{ mm}$, $L_x = 10 \text{ mm}$.

• طول موجي: $1.064 \mu\text{m}$.

3- النتائج والمناقشة:

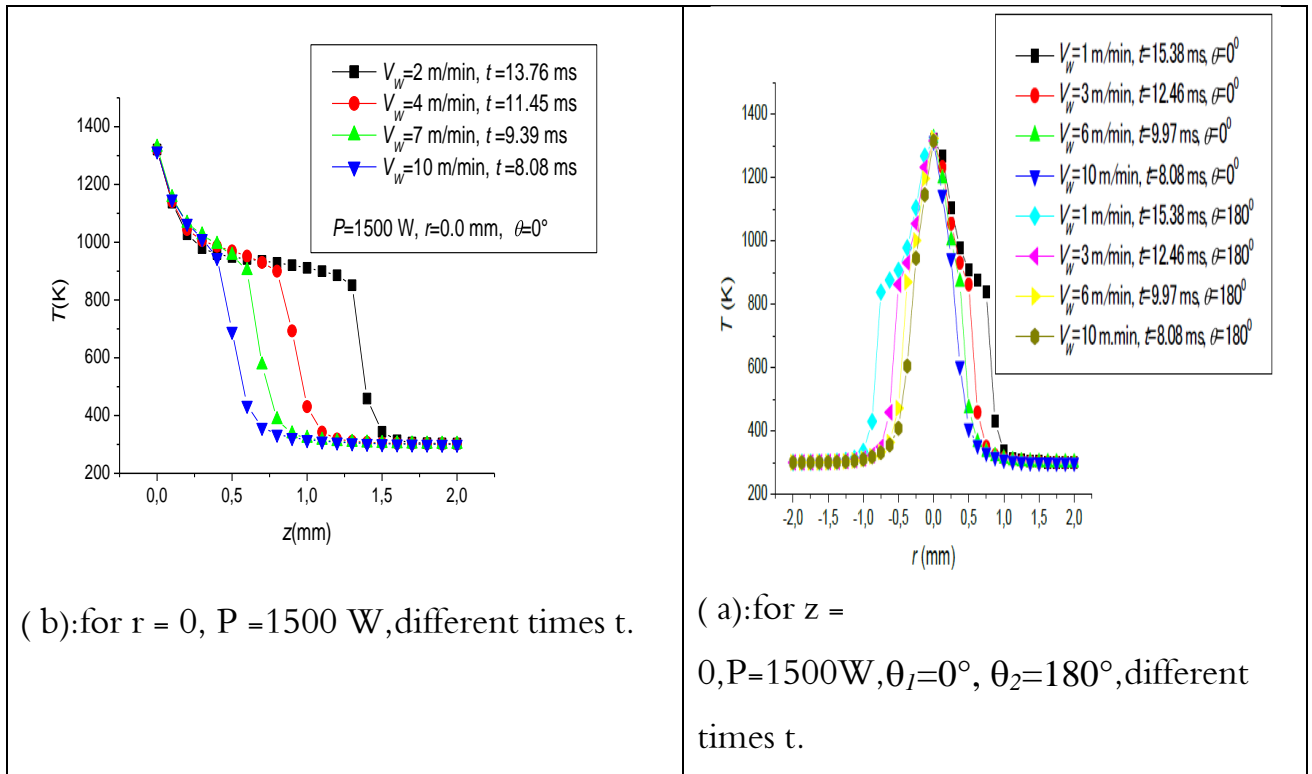
يتم عرض النتائج العددية التي تم الحصول عليها باستخدام سرعة اللحام V_w واستطاعة الليزر P وزمن اللحام ومناقشتها في الأقسام الفرعية الآتية [59]:

3-1- تغيرات درجة الحرارة بدلالة للإحداثيات r, z, θ , الزمن t ولقيم مختلفة ل P و V_w .

3-1-1- تأثير سرعة اللحام V_w

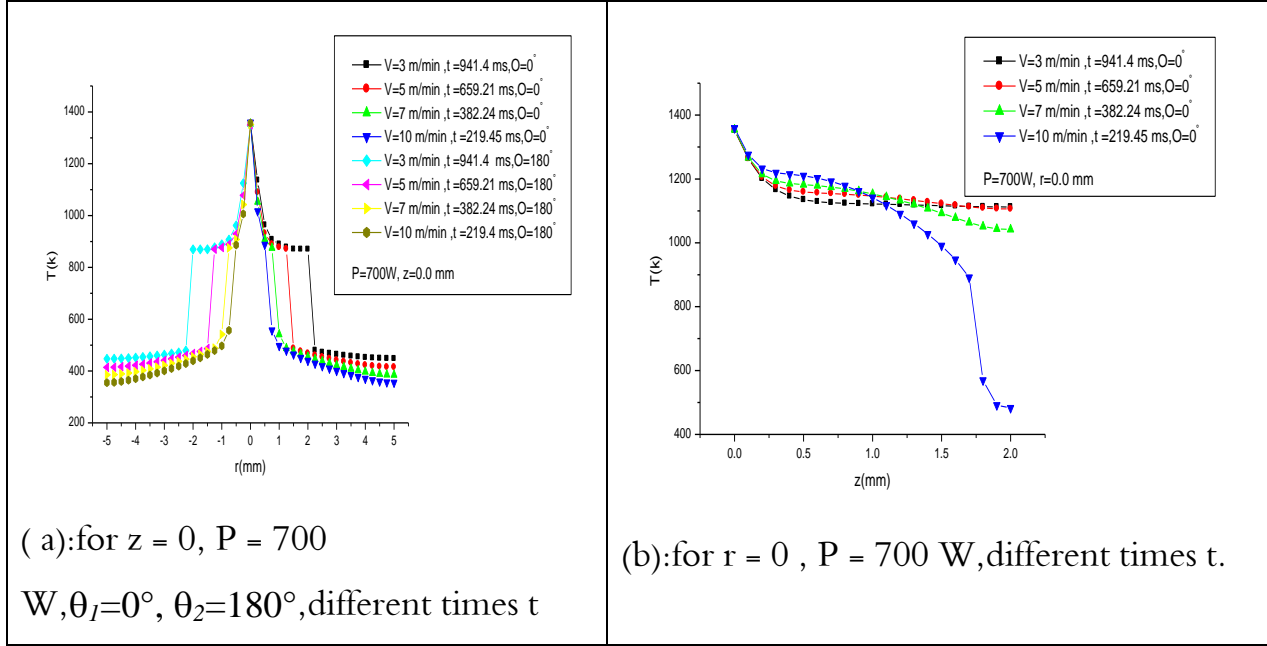
نرمز لعرض بركة اللحام $W_d = 2r$, حيث هي المسافة لدرجة حرارة الانصهار ل $z = 0$, نصف العرض يساوي r .
نرمز لعمق بركة اللحام $D = z$, حيث z هي المسافة لدرجة حرارة الانصهار ل $r = 0$.

يوضح الشكل 30 (a) تغيرات درجة الحرارة بدلالة الموضع r , $z = 0$, $P = 1500 \text{ W}$ وقيم مختلفة لسرعة اللحام. يظهر أن السرعات البطيئة (1 nim/m إلى 4 nim/m) لها عرض أكبر لبركة اللحام من السرعات السريعة (5 nim/m إلى 10 nim/m) في أزمنة مختلفة من أجل الوصول إلى نفس درجة الحرارة التبخر وهي 1380 K. كما أن درجة حرارة جبهة اللحام ($\theta_1 = 0^\circ$) و ذيل اللحام ($\theta_2 = 180^\circ$) لهما تقريبا نفس درجة الحرارة بفارق أقل من 1 K.



الشكل 29: تغيرات درجة الحرارة T بدلالة r, z , $P = 1500 \text{ W}$ وقيم مختلفة ل V_w .

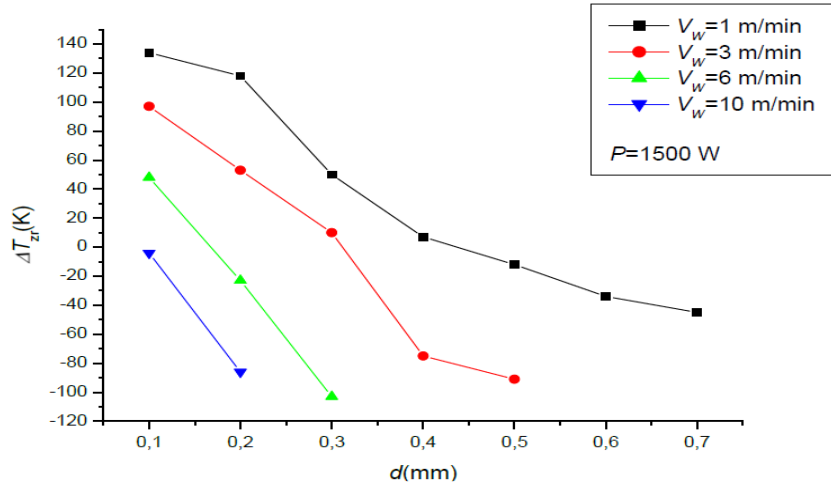
يمثل الشكل 30 (b) التغيرات في درجة الحرارة بدلالة العمق z , $r = 0$, $P = 1500 \text{ W}$ وقيم مختلفة لسرعة اللحام. يبدو أن العمق الأكبر لبركة اللحام يتوافق مع السرعات لأبطئ، وبمقارنة نتائج توزيع درجة الحرارة لنفس الاستطاعة و السرعة، نلاحظ أن امتداد عمق بركة اللحام يتجاوز نصف العرض بحوالي 0.6 mm ، عند السرعات البطيئة ثم يقل تدريجياً هذا الفرق مع زيادة السرعة، مما يعني أن السرعات الأكبر من 5 mm/min تعطي بركة اللحام أضيق وعمقاً أقل. والسرعات المنخفضة التي تقل عن (5 mm/min) ، فإنها تعطي بركة للحام أوسع وعمقاً أكبر، بالطبع عندما تصل المواضع إلى نفس درجة الحرارة.



الشكل 30: تغيرات درجة الحرارة T بدلالة z , r , $P = 700 \text{ W}$ وقيم مختلفة ل V_w .

تغيرات درجة الحرارة في الشكل 31 (a, b) لها نفس سلوك تغيرات درجة الحرارة في الشكل 30 (a, b)، لكن الامتداد عند الاستطاعة 700 W أكبر من 1500 W وهذا يعتمد على المدة الزمنية للحام التي تصل إلى نفس درجة الحرارة.

لتوضيح النتائج بشكل أكبر، يبين (الشكل 32) أن الفرق في درجة الحرارة $\Delta T_{zr} = T(r=0, z) - T(r, z=0)$ على نفس المسافة ($d=r, z$) من عرض و عمق اللحام يكون كبير عند السرعات المنخفضة أقل من (5 mm/min) . في المناطق القريبة من مركز اللحام ويحدث العكس في حالة السرعات المرتفعة. بينما في المناطق البعيدة عن مركز اللحام، يكون الاختلاف صغيراً في كل من السرعات. بشكل عام، يبدو أن التغير في الفرق ΔT_{zr} تقريباً يكون خطياً باستطاعة 1500 W .

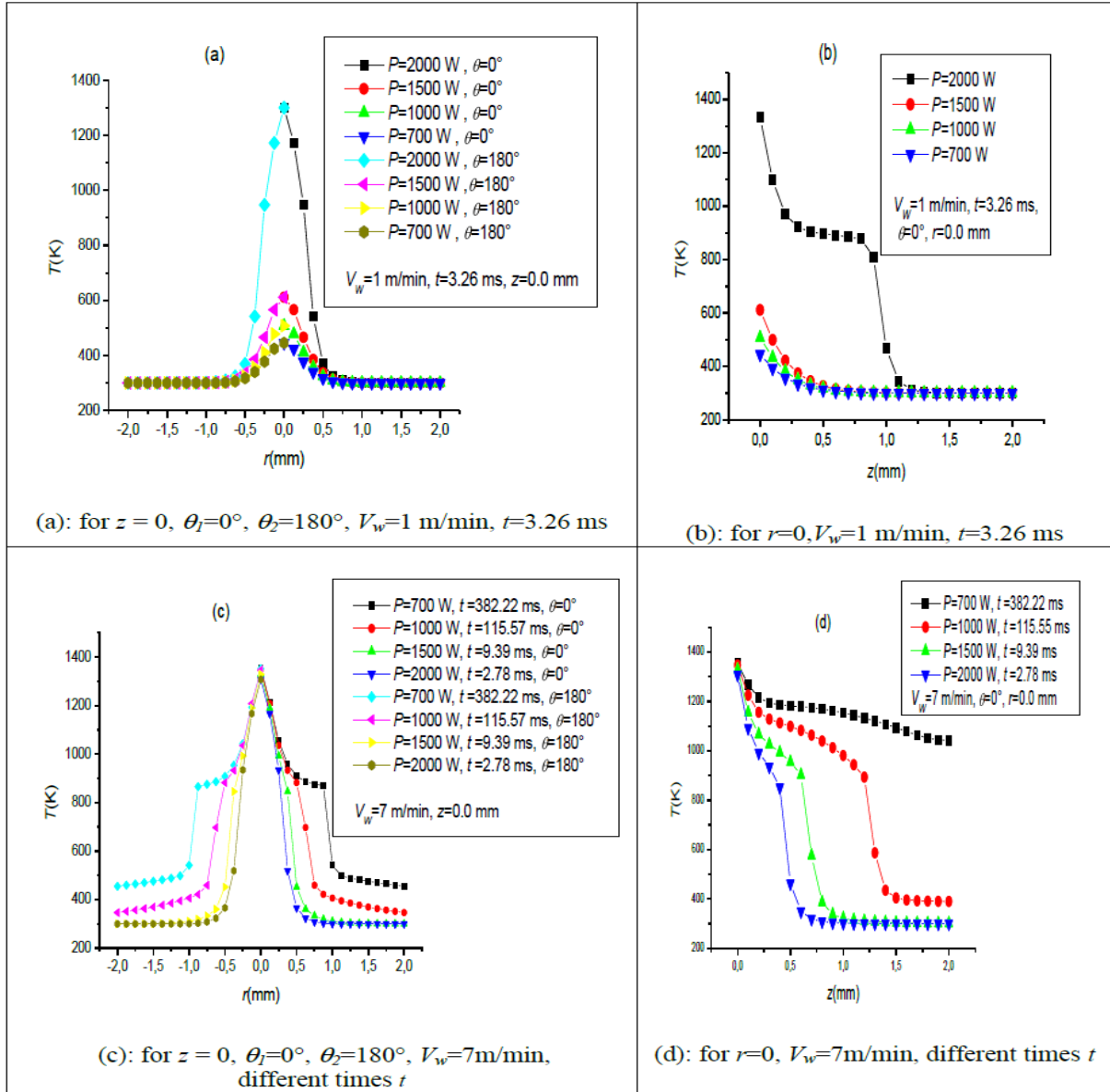


الشكل 31: الفرق في درجة الحرارة على نفس المسافة من عرض و عمق اللحام.

3-1-2- تأثير استطاعة الليزر

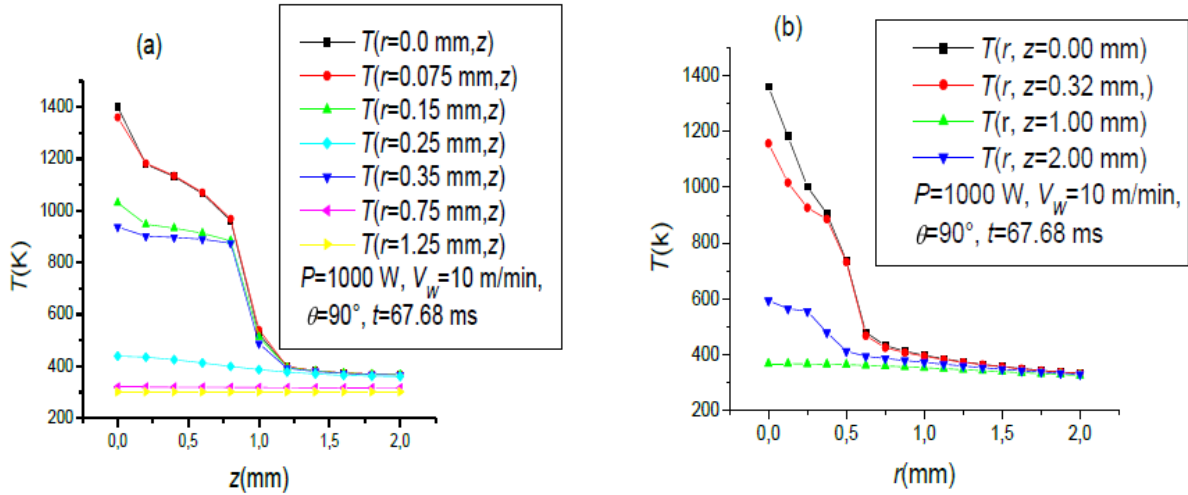
يوضح الشكل 33 (a) و (b) التغيرات في درجة الحرارة بدلالة r ، $z=0$ ، $\theta_1=0^\circ$ ، $\theta_2=180^\circ$ ، $V_w=1$ m/min و $t=3.26$ ms. تنخفض درجة حرارة بركة اللحام تدريجياً مع انخفاض استطاعة الليزر، عمق وعرض بركة اللحام أوسع وأعمق لاستطاعة الليزر التي تبلغ 2000 W، تكون درجة الحرارة مرتفعة على السطح وتنخفض تدريجياً على العرض. بالنسبة إلى الاستطاعة 2000 W يكون العمق أكبر من نصف العرض بحوالي 0.5 mm.

يحدث العكس في الشكل 33 (c) و (d)، أي أن العرض و العمق يتناقصان تدريجياً مع زيادة استطاعة الليزر وهذا بالطبع مع اختلاف الزمن من أجل الحصول على نفس درجة الحرارة 1380 K مثل 700 W و الزمن $t=382.22$ ms. ويرجع ذلك إلى تركز كثافة شعاع الليزر في المركز، مما يجعل درجة المحلية أعلى بكثير من درجة الدوبان 870 W. من أجل الحصول على العمق والعرض المطلوبين لبركة اللحام، يجب ضبط سرعة اللحام واستطاعة الليزر المناسبة وكذلك الزمن المناسب لدرجة الحرارة المطلوبة.



الشكل 32: تغيرات درجة الحرارة T بدلالة r و z وقيم مختلفة من P .

يوضح الشكل 34 التغيرات في درجة الحرارة بدلالة z و r ل $\theta = 90^\circ$ ، $P = 1000$ W، $V_w = 10$ m/min و $t = 67.68$ ms. يتضح أن تدفق المجالات الحرارية في مواضع مختلفة للعرض أو العمق يتناقص تدريجيًا عندما نبتعد عن مركز لحام قطعة العمل. التمدد الحراري في العمق أكبر من التمدد في العرض أي أن نصف العرض يمثل 50% من العمق. هذه النتيجة أيضًا مناسبة جدًا للحام بجودة أفضل حيث إنها تجعل محور اللحام أقل اتساعًا، مما يعني أن مسافة أكبر لا تتعرض للحرارة ولا تتأثر خصائصها، بينما يصل اللحام إلى عمق أكبر لقطعة العمل.

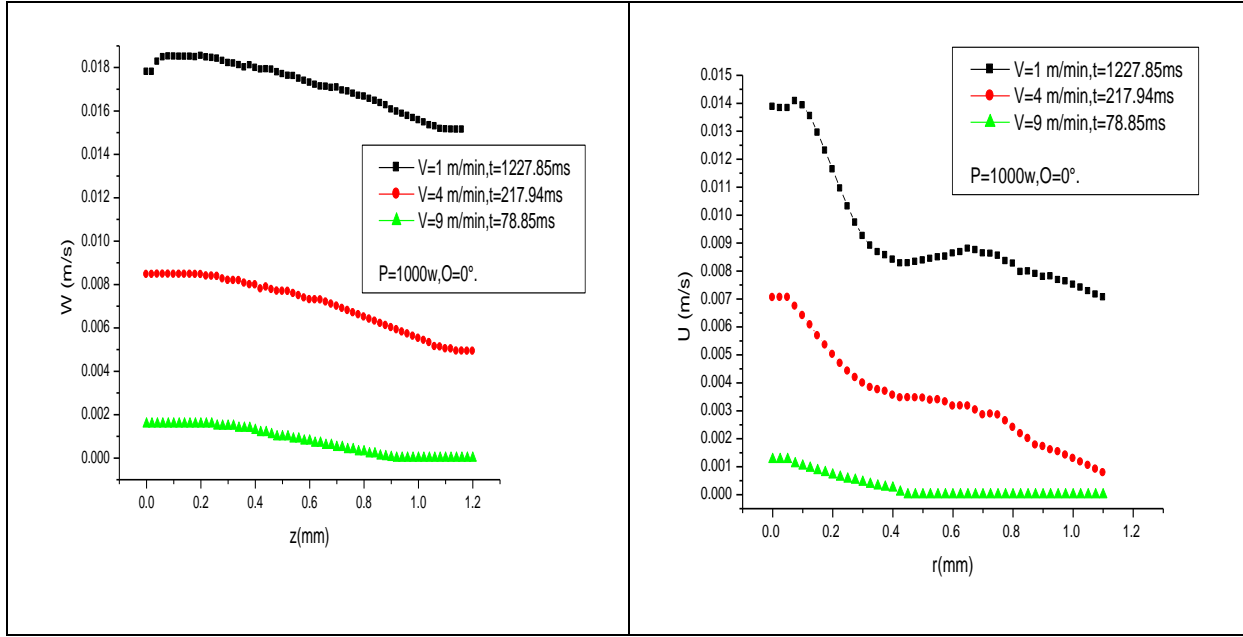


الشكل 33: تغيرات في درجة الحرارة بدلالة r و z ، $\theta = 90^\circ$ ، $P = 1000$ W، $V_w = 10$ m/min، $t = 67.68$ ms.

3-2- تغيير المركبتين U و W لسرعة المائع بدلالة r و z

3-2-1- تأثير سرعة اللحام V_w

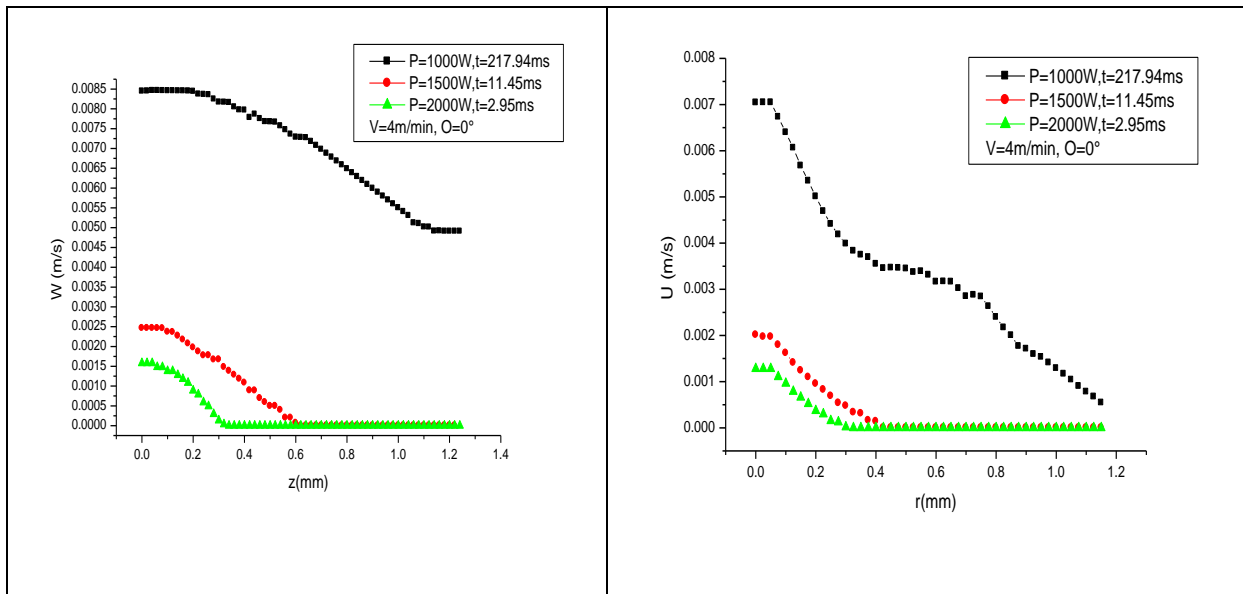
يوضح الشكل 35 التغيرات في السرعة القطرية U و المحورية W المكونة لسرعة المائع بدلالة r ، z ، وقيم مختلفة لـ V_w . تصل كل من السرعتين (U و W) إلى أقصى قيمة لهما في السطح، ثم تتناقصان تدريجياً على العرض إلى أن تنعدم على مسافة حوالي 1 mm من عرض وعمق بركة اللحام. نلاحظ أيضاً أن سرعات اللحام المنخفضة (اقل من 5 m/min) لها تدفق وامتداد عاليان في بركة اللحام، بينما يحدث العكس بسرعات المرتفعة (أكبر من 5 m/min). وهذا ما يفسر زيادة عرض محور اللحام في الدراسة التجريبية عند السرعات المنخفضة، وتقلص حجم محور اللحام بسرعات المرتفعة. على سبيل المثال، عند 9 m/min تكون سرعة المائع حوالي 0.001 m/s، أي يصبح المائع عندها شبه ساكن. بشكل عام، الفرق بين السرعتين (U و W) صغير جداً.



الشكل 34: تغيرات السرعة القطرية U والمحورية W المكونة لسرعة المائع بدلالة r, z وقيم مختلفة ل V_w .

3-2-2- تأثير استطاعة الليزر

يوضح الشكل 36 التغيرات في السرعة القطرية U والمحورية W المكونة لسرعة المائع بدلالة r و z وقيم مختلفة من P . حيث تكون لكلتا سرعتين (U و W) قيمة مرتفعة عند استطاعة الليزر المنخفضة (أقل من $1000 W$)، وتقل كليهما تدريجياً مع ارتفاع استطاعة الليزر (أكبر من $1500 W$) خلال أزمنة اللحام المختلفة، من أجل الوصول إلى نفس درجة الحرارة. نجد أيضاً في الدراسة التجريبية أنه عند استطاعة الليزر المرتفعة، تكون المنطقة المتضررة حرارياً الناتجة ضيقة جداً مقارنة مع حالة استخدام استطاعة الليزر المنخفضة. تتناقص سرعتي المائع (U و W) تدريجياً مع عمق وعرض بركة اللحام؛ إلى أن تنعدم على مسافة حوالي $1 mm$.



الشكل 35: تغيرات السرعة القطرية U والمحورية W المكونة لسرعة المائع بدلالة r و z وقيم مختلفة من P .

3-3- المقارنة بين سرعة المائع و سرعة اللحام

3-3-1- تأثير سرعة اللحام V_w

يمثل الجدول 6 النسبة بين سرعة اللحام وسرعة المائع من أجل استطاعة 1000 W. يُلاحظ أن سرعات تدفق المائع (U و W) تساوي تقريبًا سرعة اللحام عند 1 m/min. وهذا يفسر الحجم الكبير لبركة اللحام بسرعات البطيئة، ثم تزداد النسبة بين السرعتين مع زيادة سرعة اللحام حتى 10 m/min. تؤثر النسبة الكبيرة بين السرعتين سلباً على جودة اللحام، وذلك من خلال ظهور المسام وتصدع شقوق نتيجة احتباس الغازات داخل المعدن.

الجدول 6: يمثل النسبة بين السرعة اللحام وسرعة المائع بدلالة تغير V_w .

| $V_w(m/s)$ | P(W) | U(m/s) | W(m/s) | V_w/U | V_w/W |
|------------|------|---------|---------|---------|---------|
| 0.01666 | 1000 | 0.01386 | 0.01778 | 1.20 | 0.94 |
| 0.06666 | | 0.00704 | 0.00845 | 9.46 | 7.88 |
| 0.15 | | 0.00126 | 0.00157 | 119.042 | 95.54 |

3-3-2- تأثير استطاعة الليزر

يمثل الجدول 7 النسبة بين السرعة اللحام وسرعة المائع بدلالة تغير P من أجل سرعة اللحام 4 m/min. تتجاوز سرعة اللحام سرعة تدفق المائع القطرية من 9 إلى 52 مرة، وكذلك سرعة المائع المحورية من 7 إلى 42 مرة مع زيادة استطاعة الليزر. وهذا مناسب جدًا للحفاظ على سبائك المعدن، وهذا ينطبق على ما قدمنا في الشكل 36.

الجدول 7: يمثل النسبة بين سرعة اللحام وسرعة المائع بدلالة تغير P.

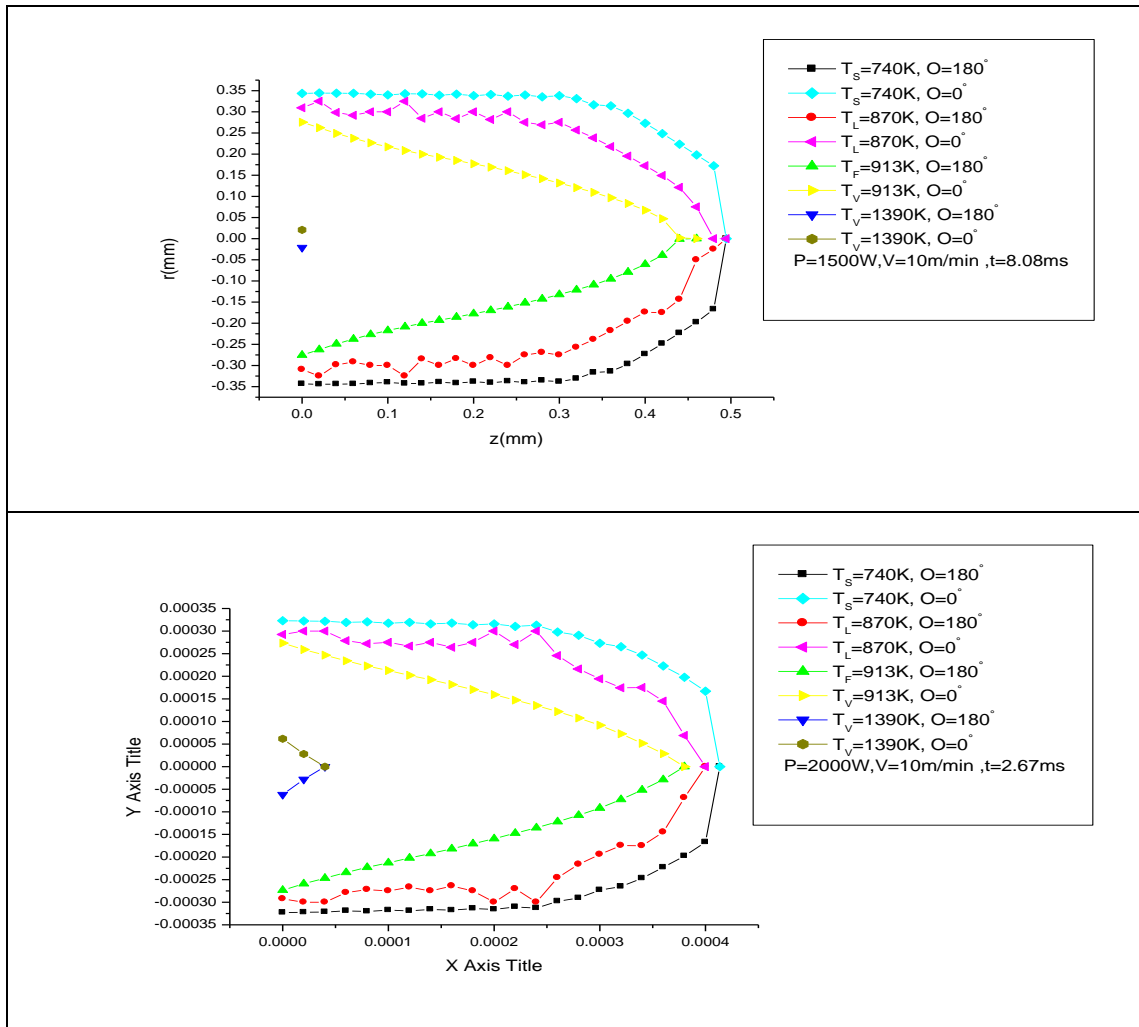
| P(W) | $V_w(m/s)$ | U(m/s) | W(m/s) | V_w/U | V_w/W |
|------|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1000 | 0.06666 | 0.00704 | 0.00845 | 9.46 | 7.88 |
| 1500 | | 0.00201 | 0.00246 | 33.16 | 27.09 |
| 2000 | | 0.00128 | 0.00158 | 52.07 | 42.18 |

3-4- تحديد المقطع الطولي لبركة اللحام :

3-4-1- تأثير استطاعة الليزر

يوضح الشكل 37 مقطعاً طويلاً لبركة اللحام ل 1000 W و 1500 W و $V_w = 10\text{ m/min}$. يتم أخذ المقطع الطولي للمواضع (r, z) المتماثلة حرارياً لمستوي جبهة اللحام $(\theta_1 = 0)$ ومستوي ذيل اللحام $(\theta_2 = 180)$ لدرجات الحرارة المختلفة $T_S = 740\text{ K}$, $T_L = 870\text{ K}$, $T_2 = 913\text{ K}$ و $T_V = 1390\text{ K}$. يتم اختيار درجة الحرارة T_2 بين درجة الحرارة السائلة T_L ودرجة حرارة الغليان T_V , حيث يكون الوسط في حالة سائلة تماماً.

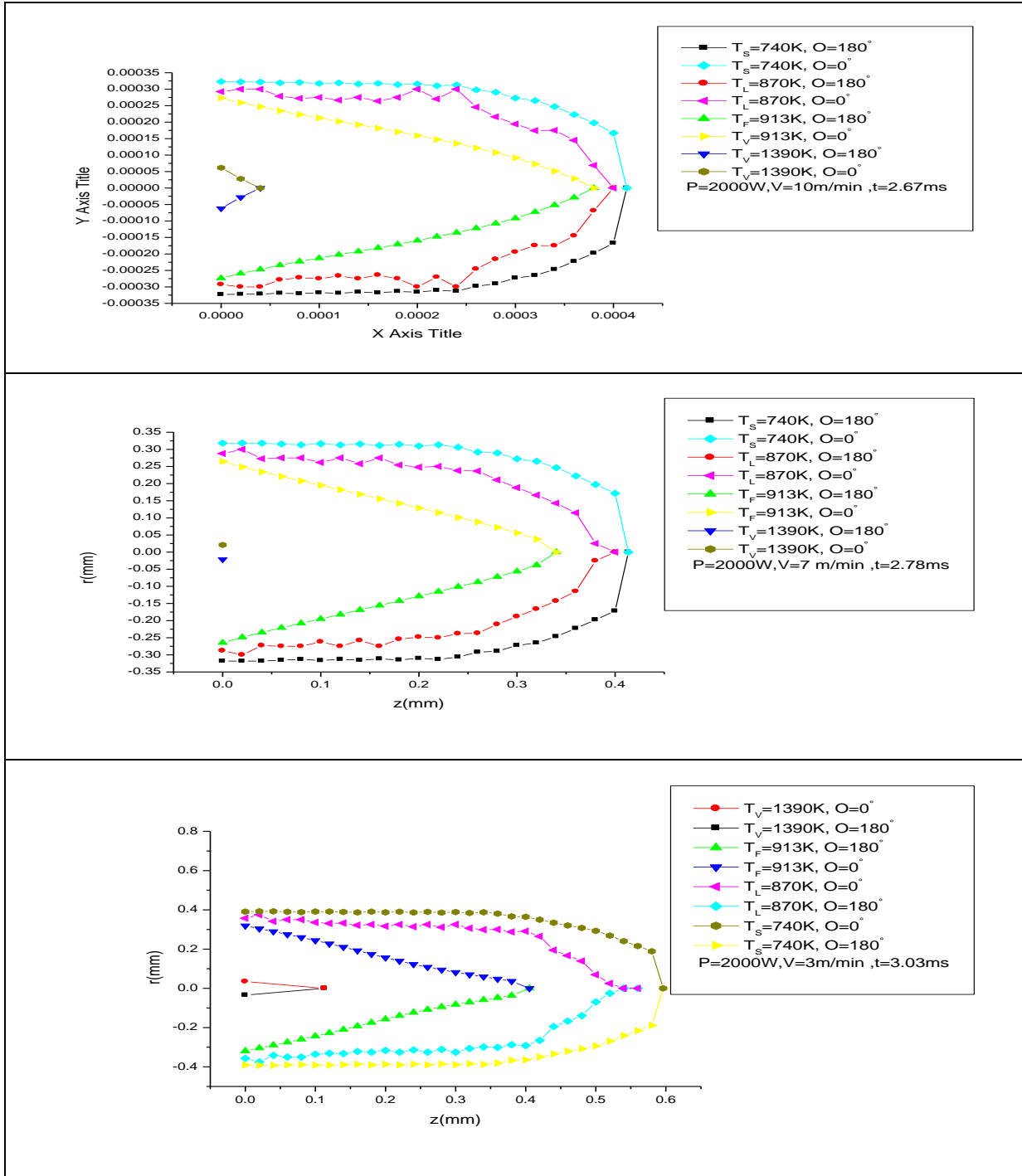
منحنيات كل من الاستطاعة 2000 W و 1500 W ، تعطي مقطعاً طويلاً لبركة اللحام متقاربين بشكل كبير لهما تناسق كبير بين جبهة و ذيل اللحام. المسافات بين المادة الصلبة والسائلة (المنطقة اللينة)، للمواضع المتماثلة حرارياً قابلة للمقارنة. هذه المسافات أصغر بكثير من المسافات بين السائلة إلى الغليان، مما يعطي تجانساً جيداً لمحور اللحام. التناظر الملحوظ للمواضع المتماثلة حرارياً ل T_2 في حالة السائل، يمكننا بسهولة رؤية التناسق الكبير بين جبهة وذيل اللحام.



الشكل 36: مقطع طولي لحوض اللحام من أجل 1500W و 2000W و $V_w = 10\text{ m/min}$.

3-4-2- تأثير سرعة اللحام V_w

يوضح الشكل 38 مقطعاً طولياً لبركة اللحام ل $P=2000\text{ W}$ وقيم مختلفة ل V_w , تزداد بركة اللحام على مستوى العرض و العمق بفارق ضعيف بحوالي 0.1 mm مع تناقص السرعة. يوجد تناظر كبير بين ذيل و جبهة اللحام في مختلف مناطق بركة اللحام. ما يميز عملية اللحام بالليزر أن المنطقة اللينة ضيقة جداً مقارنة بطرق اللحام الأخرى، مما يحافظ على سلامة وجودة المعدن.



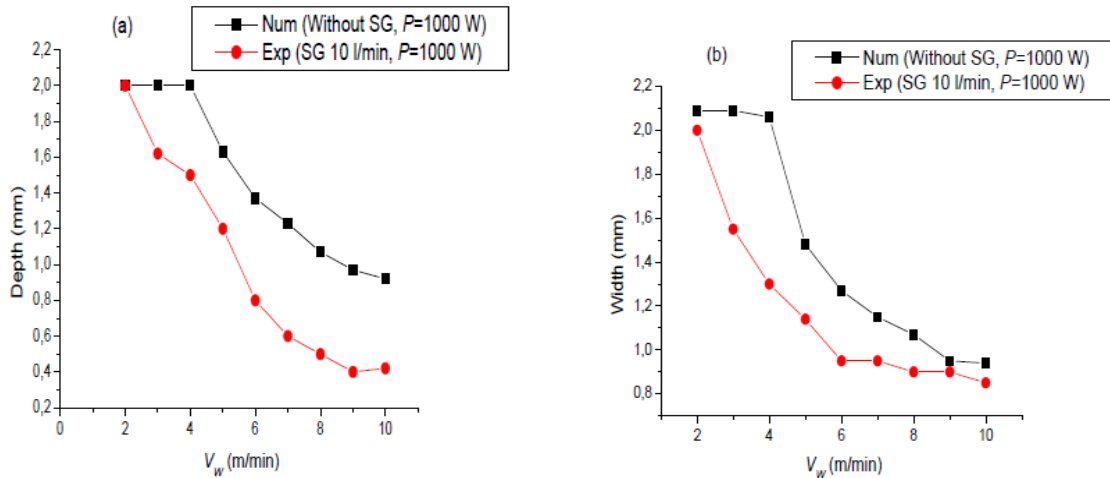
الشكل 37: مقطع طولى لبركة اللحام من أجل $P=2000\text{ W}$ وقيم مختلفة ل V_w .

3-5- مقارنة بين الدراسة العددية و التجريبية

أجرينا حسابات لظروف مشابهة للعمل التجريبي و العددي [13, 14]. في هذا العمل الذي قام بيه K. Abderrazaket al. تم استخدام ليزر Nd:YAG في لحام صفائح رقيقة من سبيكة المغنيزيوم AZ91 بتأثير استطاعة وسرعة الليزر وغاز الحماية. تم تحديد هندسة المقطع العرضي للحام عن طريق التحليل المجهرى البصرى. اللحامات المنجزة مع غاز الحماية بسرعة $V_{gas}=10 \text{ l/min}$, 20 l/min , 30 l/min . قارنا نتائجنا العددية بدون غاز الحماية أو التدريع (بدون SG) مع النتائج التجريبية [13] بغاز الحماية بسرعة $V_{gas}=10 \text{ l/min}$. يوضح الشكل 39 عرض و عمق الاختراق لمحور اللحام بدلالة سرعة اللحام واستطاعة الليزر $P = 1000 \text{ W}$.

نشير إلى قيم $W_{d,exp}$ و $W_{d,our}$ لعرضنا المحسوب و التجريبي على التوالي. نشير إلى قيم D_{exp} و D_{our} لعمقنا المحسوب و التجريبي على التوالي. يعرض الجدول 8 النسب $W_{d,exp}/W_{d,our}$ و D_{our}/D_{exp} لقيم مختلفة لسرعة اللحام ولثلاث قيم للاستطاعة الليزر 800 W و 1000 W و 1500 W . لدينا القيمة القصوى لنسبة $W_{d,exp}/W_{d,our}$ للاستطاعات الثلاث هي 1.85 و 1.35 و 1.35 على التوالي، والحد الأدنى للنسبة 1.04 و 1.35 و 0.46 على التوالي. القيمة القصوى لنسبة D_{our}/D_{exp} للاستطاعات الثلاث هي 4.10 و 2.67 و 0.89 على التوالي، الحد الأدنى لقيمة النسبة هي 1.14 و 1.00 و 0.49 على التوالي.

تظهر المقارنة أن النتائج على العرض أكثر دقة من النتائج على العمق. يوضح أن عرض بركة اللحام هو تقريب جيد للدراسة تجريبية، أي أن توزيعات درجة الحرارة و السرعة على السطح سبيكة مغنيزيوم صحيحة إلى حد كبير؛ ولدينا نفس النتيجة لاستطاعات الليزر الأخرى من 700 W إلى 2000 W كما هو موضح في الجدول 8. تبين المقارنة أن عمق بركة اللحام أقل من عمق الدراسة التجريبية. من المحتمل أن تكون هذه الاختلافات ناتجة عن عدم وجود غاز الحماية في دراستنا العددية وبعض الافتراضات البسيطة التي تم أخذها في نموذجنا، مثل شكل المصطلح لمصدر طاقة الليزر.



الشكل 38: عرض و عمق اختراق محور اللحام بدلالة سرعة اللحام واستطاعة الليزر $P = 1000 \text{ W}$.

تظهر النتائج التجريبية و العددية ل[13، 14، 64] اعتمادهم على أن حجم بركة اللحام كأحد معايير اللحام. يمكن أن يكون البرنامج العددي فعالاً في حساب الحجم (العرض و العمق) لبركة اللحام و التنبؤ به، اعتماداً على متغيرات اللحام (سرعة و استطاعة الليزر).

الجدول 8: النسبتين لقيم التجريبية والعددية لعرض و عمق بركة اللحام لقيم مختلفة من V_w و $P=800W, 1000W, 1500W$.

| V_w (m/min) | $P=1500 W$ | | $P=1000 W$ | | $P=800 W$ | |
|---------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| | $W_{d,our}/W_{d,exp}$ | D_{our}/D_{exp} | $W_{d,our}/W_{d,exp}$ | D_{our}/D_{exp} | $W_{d,our}/W_{d,exp}$ | D_{our}/D_{exp} |
| 2.0 | 1.50 | 1.14 | 1.04 | 1.00 | 0.47 | 0.63 |
| 3.0 | 1.85 | 1.51 | 1.35 | 1.23 | 0.46 | 0.49 |
| 5.0 | 1.77 | 2.00 | 1.30 | 1.36 | 0.53 | 0.67 |
| 6.0 | 1.72 | 2.60 | 1.34 | 1.71 | 0.54 | 0.71 |
| 7.0 | 1.73 | 3.85 | 1.21 | 2.05 | 0.51 | 0.70 |
| 8.0 | 1.62 | 4.10 | 1.18 | 2.67 | 0.54 | 0.73 |
| 10.0 | 1.35 | 3.72 | 1.10 | 2.19 | 1.35 | 0.89 |

4- خلاصة:

في هذا الفصل ، قدمنا نتائج النمذجة العددية للحام بالليزر Nd: YAG المستمر على سبائك المغنيسيوم من أجل حساب توزيعات درجة الحرارة والسرعة وتحديد حجم بركة اللحام، والذي يعتمد على تأثير متغيرات اللحام (استطاعة و السرعة). يعتبر التباين في توزيعات درجة الحرارة مسؤولاً عن تحديد أبعاد بركة اللحام أكثر من سرعة تدفق السوائل ذات التأثير ضعيف. لذلك، فإن الوصول إلى لحام عالي الجودة يعتمد على ضبط قوة و سرعة الليزر المناسبة لتحديد عرض وعمق محور اللحام، وذلك لتجنب العديد من مشاكل اللحام مثل التشققات والمسامية. إن وصولنا إلى تقارب جيد بين النتائج الحسابية والتجريبية يشير إلى قوة البرنامج المنفذ رغم وجود بعض الافتراضات البسيطة فيه.

الخلاصة العامة والأفاق

المستقبلية

الخلاصة العامة والأفاق المستقبلية

تتضمن عملية اللحام بالليزر ظواهر مختلفة ويتم دراستها حاليًا من قبل العديد من الباحثين. في دراستنا، يعد هذا جزءًا من الفهم العالمي للظواهر المختلفة، من خلال المعالجة العددية التي تقدم نموذجًا يحاكي تدفق المائع في بركة اللحام بالليزر لحساب توزيعات درجة الحرارة وسرعة المائع لصفحة من سبائك المغنيسيوم.

تناول **الفصل الأول** من الرسالة دراسة وثائقية لعملية اللحام بالليزر وأهميتها في مختلف المجالات؛ وكذلك الطريقة المستخدمة ونوع الليزر. كما تطرق إلى أهمية سبائك المغنيسيوم من خلال مزاياها واستخدامها في القطاعات الصناعية.

في **الفصل الثاني** قدمنا مبدأ النمذجة العددية: دراسة بعض القوى الناتجة عن عملية اللحام وهي التوتر السطحي، حمل المارننجوي وقوة الطفو وإدراجها في معادلة إنحفاظ كمية الحركة، مصدر حرارة السطح وهو خطوة مهمة في المحاكاة وإضافته إلى معادلة الطاقة. يحل النموذج العددي باستعمال طريقة الحجوم المنتهية لمعادلات المائع (معدلات حفظ كمية الحركة، والاستمرارية، والطاقة) وهي معادلات غير خطية تحول المسألة إلى أنظمة معادلات خطية مرتبطة في شكل معادلات مصفوفات يمكن حلها باستخدام خوارزمية Gauss–Seidel التكرارية.

خصص **الفصل الثالث** للنتائج العددية التي تم الحصول عليها من عملية البرمجة. في البداية، قدمنا توزيعات درجة الحرارة على أبعاد سبيكة المغنيسيوم أثناء اللحام من حيث الزمن والموضع في حالتين: تأثير سرعة الليزر وتأثير استطاعة الليزر. نفس السلوك الذي قدمناه أيضًا لتوزيعات سرعة تدفق المائع وتحديد أبعاد بركة اللحام (عمق الاختراق والعرض).

في هذا النمذجة، اعتبرنا أن سبائك المغنيسيوم ذات الأبعاد (2 mm x 5 mm x 10 mm) متحركة والليزر ثابت، والنهائيات الحدية لحواف السبيكة تغير بطيء مع القيم التي قبلها، سواء في السرعة أو درجة الحرارة.

تمت مقارنة نتائج عملنا مع نتائج العمل التجريبي والعددي لـ K. Abderrazak et al. [13, 14] لسبائك المغنيسيوم AZ91؛ أظهرت المقارنة توافقًا جيدًا بين النتائج التجريبية من خلال تحديد عمق وعرض حوض اللحام اعتمادًا على توزيع الحرارة في حوض اللحام.

الاستنتاجات الرئيسية لدراستنا هي كما يلي:

- يعتمد توزيع درجة الحرارة بشكل كبير على سرعة قطعة العمل واستطاعة الليزر.
- يعتمد عرض وعمق بركة اللحام بشكل كبير على التغير في درجة الحرارة وتأثير سرعة تدفق المائع ضعيف جدًا.

- يختلف انتشار الحرارة على عرض وعمق بركة اللحام. حيث يكون الفرق بينهما واضحاً عند السرعات العالية أي ما فوق أو يساوي السرعة (5 m/min) ويكون الفرق ضعيفاً عند السرعات البطيئة اقل من (5 m/min).
 - تنخفض درجة الحرارة حجم بركة اللحام تدريجياً مع انخفاض استطاعة الليزر؛ عمق وعرض حوض اللحام أوسع وأعمق لاستطاعة الليزر التي تبلغ 2000 W. تكون درجة الحرارة مرتفعة في السطح وتنخفض تدريجياً على العرض، بالنسبة إلى 2000 W يحدث العكس مع اختلاف في الزمن. العمق أكبر من نصف العرض بحوالي 0.5 mm.
 - التمدد الحراري في العمق أكبر من التمدد الحراري في نصف العرض، نصف العرض يمثل 50% من العمق.
 - تكون كلتا السرعتين (U و W) قيمة مرتفعة عند استطاعة الليزر الضعيفة (اقل من 1000 W) وتقل كلاهما تدريجياً مع ارتفاع استطاعة الليزر (أكبر من 1500 W) خلال أزمنة اللحام المختلفة.
 - تصل كلتا السرعتين (U و W) إلى أقصى قيم لها في السطح، ثم تتناقص تدريجياً على العرض إلى أن تنعدم على مسافة حوالي 1 mm من عرض وعمق حوض اللحام.
 - سرعات اللحام المنخفضة (اقل من 5 m/min) لها تدفق وامتداد عالي في بركة اللحام، بينما يحدث العكس بسرعات المرتفعة (أكبر من 5 m/min).
 - سرعة تدفق المائع تساوي تقريباً سرعة اللحام عند 1 m/min. هذا يفسر الحجم الكبير لبركة اللحام بسرعات بطيئة، ثم تفوق سرعة اللحام سرعة التدفق عند السرعات العالية وعليه يكون حجم البركة أقل مع زيادة سرعة اللحام إلى غاية 10 m/min.
 - عند الاستطاعة (2000 W, 1500 W و 1000 W) يكون عرض وعمق بركة اللحام أكبر وعند الاستطاعة (700 W, 800 W) يكون عرض وعمق أقل عند نفس الزمن، والعكس يحدث عند الزمن مختلف من أجل الوصول نفس درجة الحرارة مثل درجة التبخر 1380 K.
 - عند تناقص السرعة يزداد العمق على العرض في بركة اللحام بفارق طفيف يبلغ حوالي 0.1 mm.
 - المنطقة اللينة (الصلبة / السائلة) للمواضع المتماثلة حرارياً أصغر بكثير من المنطقة الذائبة (السائلة/ الغليان).
 - للتنبؤ بدقة بحجم بركة اللحام، يجب علينا ضبط سرعة اللحام واستطاعة الليزر المناسبة، وكذلك الزمن المناسب لدرجة الحرارة المطلوبة.
 - أظهر البرنامج العددي توافقاً جيداً مع نتائج التجربة. يمكن أن يكون أداة مفيدة للنتبؤ بحجم (عرض وعمق) بركة اللحام.
- سيكون من المثير للاهتمام دراسة تأثير تبخير المعادن و تأثير الغازات الحامية على درجات الحرارة و تأثيره على محور اللحام. وأيضاً إضافة الضياع في الطاقة بسبب الإشعاع وعن طريق الحمل الحراري إلى العمليات الحسابية. علاوة على ذلك، سيكون من المثير للاهتمام دراسة مرحلة التبريد على وجه التحديد وكيف تؤثر على تراكيب المادة.

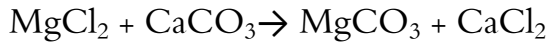
الملاحق

I الملحق

سبائك المغنيزيوم

1- طريقة الحصول على المغنيزيوم:

المغنيزيوم يعد من اخف المعادن ويحتل المركز الثالث من حيث الوزن بعد الألمونيوم؛ تم فصل هذا العنصر عن المركبات الأخرى في عام 1808 بواسطة العالم الإنجليزي ديفي. يكون المغنيزيوم إما في صورة كلوريد المغنيزيوم ($MgCl_2$) والذي يحتوي على 21% مغنيزيوم. أو في مركب الكارنالت ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) والذي يحتوي على 9% مغنيزيوم . أشهر طريقة لاستخراج عنصر المغنيزيوم من البحر، هي طريقة داو حيث يؤتى بالجير المستخرج من صخور الدولوميت وتمزج مع ماء البحر المحتوي على كلوريد المغنيزيوم. فيتفاعل مع بعض وينتج كلوريد الكالسيوم وكربونات المغنيزيوم.



المركب الأخير غير منحل بالماء فيفصل عن المزيج ويصفى ثم يفاعل مع حمض الهيدروكلوريك، فيتكون كلوريد المغنيزيوم الذي يكون الآن بشكل منفصل عن بقية الأملاح بالإضافة إلى الماء .



يبخر الماء فيتبقى كلوريد المغنيزيوم الذي يتم صهره عند درجة حرارة $710^\circ C$. ثم تتم عملية تحليل كهربائي للمصهور فنحصل على مغنيزيوم وغاز الكلور [65].

المغنيزيوم الآن يستخدم بشكل واسع في كثير من التطبيقات والأسواق التجارية. ويستخدم في الصناعات الميكانيكية ويدخل من ضمن عناصر في إنتاج السبائك. إن إنتاج العالم من المغنيزيوم حوالي 400 الف طن سنويا، و هذا الرقم يزداد سنويا حيث أن المغنيزيوم يمتاز بالوزن الخفيف، وأن المنتجات التي يدخل المغنيزيوم في صناعتها تزداد مثل صناعة السيارات لتقليل وزنها وكذلك تقليل الغازات ذات الاحتباس الحراري.



الشكل 39: معدن المغنيزيوم المستخرج [65].

2- أهم سبائك المغنيزيوم:

الجدول 9: أهم سبائك المغنيزيوم [66].

| السيبكية | ألومنيوم | منغنيز | خارصين | زركونيوم | أخرى | مقاومة الشد (مليون بسكال) | مقاومة الخضوع (مليون بسكال) | الاستطالة (%) | صلادة (برينل) |
|----------------------------|----------|--------|--------|----------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| مسبوكات رملية وقوالب دائمة | | | | | | | | | |
| AM100A-T61 | 10 | 0.1 | | | | 275 | 150 | 1 | 69 |
| AZ91C | 8.7 | 0.13 | 0.7 | | | 275 | 145 | 6 | 66 |
| EQ21A-T6 | | | | 0.7 | 1,5 فضة و 2.1 ديديميوم | 235 | 195 | 2 | 65 - 85 |
| ZE41A-T5 | | | 4.2 | 0.7 | 1,2 سببكية سيريوم مطبعية | 205 | 140 | 3,5 | 62 |
| مسبوكات إسطميات | | | | | | | | | |
| AM20-F | 2.1 | 0.1 | | | | 210 | 90 | 20 | 45 |
| AS21-F | 2.2 | 0.1 | | | 1 سيليكون | 220 | 120 | 13 | 55 |
| مطروقات | | | | | | | | | |
| AZ61B-F | 6 | 0.2 | 1 | | | 260 | 170 | 15 | 50 |
| ZK31-T5 | | | 3 | 0.6 | | 290 | 210 | 7 | -- |

| مبثوقات | | | | | | | | | |
|--------------|----|-----|-----|--|--|-----|-----|-----|-----------|
| -- | 10 | 145 | 240 | | | 0.4 | 0.2 | 1.2 | AZ10-F |
| 44 | 12 | 180 | 255 | | | | 1.2 | | M1A-F |
| ألواح وصفائح | | | | | | | | | |
| 73 | 15 | 220 | 290 | | | 1 | 0.2 | 3 | AZ31B-H24 |

3- تأثير العناصر المضافة على سبائك المغنيزيوم:

الجدول 10: تأثير العناصر المضافة على سبائك المغنيزيوم [66].

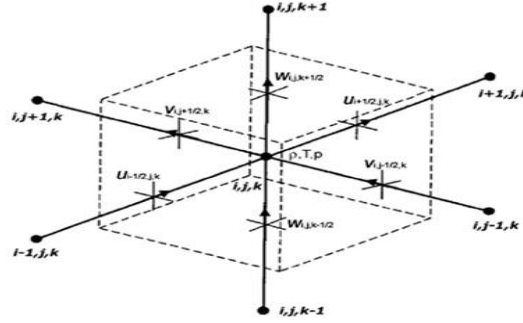
| الرمز | العنصر | تأثيره |
|-------|---------------------------------------|---|
| A | ألومنيوم (Al) | له أفضل تأثير على سبائك المغنيزيوم مقارنة بالعناصر الأخرى، يحسن المقاومة و الصلادة يوسع مدى التجمد ويحسن قابلية الصب، يجعل السبائك قابلة للمعالجة الحرارية عند وجوده بنسب أعلى من 6%، النسبة 6% تضمن توليفة مثالية من المقاومة و المطيلية . |
| C | نحاس (Cu) | يضر بمقاومة سبائك المغنيزيوم للتآكل عند وجوده بنسب أكبر من 0,05%، إلا أنه يحسن من المقاومة في درجة الحرارة العالية . |
| E | فلزات أرضية نادرة (Ce,Nd,Pr,La,.....) | تضاف إما في شكل سبيكة السيريوم النادرة (50 %) سيريوم و الباقي لنتانيوم و نيوديوم أو سبيكة الديديميوم النادرة (85 %) نيوديوم و الباقي براسيوديوم و كلاهما سبائك طبيعية تنتج عن الاستخلاص و لا يمكن فصل مكوناتها بسهولة و لا يُحتاج لذلك. ترفع هذه الإضافات من مقاومة سبائك المغنيزيوم في درجة الحرارة المرتفعة، وتقلل من تشرخ اللحامات و المسامية عند السباكة . |
| K | زركونيوم (Zr) | له تأثير قوى مُتعمِّم للحبيبات و ذلك لتكوينه لمراكز تنوية متغايرة لحبيبات المغنيزيوم مبكراً أثناء التجمد. يعمل جيداً في سبائك المغنيزيوم المحتوية على الحارصين و الفلزات النادرة و الثوريوم، و لكن تأثيره في تنعيم الحبيبات يضعف في السبائك المحتوية على ألومنيوم أو منغنيز لأنه يتفاعل معها مكوناً مركبات بين-فلزية مما يؤدي إلى استهلاكه فلا يقوم بتنعيم الحبيبات . |
| H | ثوريوم (Th) | يرفع من مقاومة (في درجة الحرارة تصل إلى 370°c). يستخدم منه ما بين 2 و 3% بالإضافة لعناصر أخرى مثل الحارصين و الزركونيوم .يحسن قابلية اللحام للسبائك المحتوية |

| | | |
|---|----------------------|--|
| | | على خارصين . |
| L | ليثيوم (Li) | له ذوبانية كبيرة في الحالة الجامدة تصل إلى 5,5% ونظراً لخفة وزنه فهو عنصر سبيكي مرغوب فيه جداً. تكفي نسبة 11% منه لتكوين و تثبيت الطور بيتا (β) ذو البنية المكعبية المتمركزة الجسم خلافاً للبنية السداسية كثيفة الرص الأولية مما يؤدي إلى تحسين قابلية التشكيل للمنتجات المطاوعة .تخفف إضافته المقاومة و ترفع المطيلية. تطبيقات سبائك المغنيزيوم-ليثيوم الثنائية محدودة . |
| M | منغنيز (Mn) | ليس له تأثير كبير على مقاومة الشد و لكنه يرفع من مقاومة الخضوع، و أهم وظائفه هو تحسين مقاومة سبائك (المغنيزيوم-ألومنيوم و المغنيزيوم-ألومنيوم-خارصين). لا تتجاوز إضافته 1,5% في كافة الأحوال . |
| Q | فضة (Ag) | تحسن الخواص الميكانيكية بزيادة الاستجابة للتقسية بالتعتيق . |
| S | سيلكون (Si) | يزيد من السيولة و يخفف من مقاومة التآكل عند وجود حديد في السبيكة . |
| W | إتريوم (Yb) | له ذوبانية عالية في الحالة الجامدة (4,12%)، يضاف مع الفلزات النادرة لتحسين مقاومة حتى درجة حرارة 300C° . |
| Z | خارصين أو الزنك (Zn) | يلي الألومنيوم في فاعليته كعنصر سبيكي و يستخدم مع الألومنيوم لتحسين المقاومة في درجة الحرارة العادية و لكنه يفاقم من تكوين الشروخ أثناء التجمد عند إضافته بنسبة أكبر من 1% . للسبائك المحتوية على 7 - 10% ألومنيوم. يستخدم مع عناصر أخرى مثل الزركونيوم والفلزات النادرة لإنتاج سبائك مغنيزيوم قابلة للتقسية بالترسيب (تقسية بالتعتيق). ويساعد في مقاومة التأثير الضار على مقاومة التآكل الذي تحدثه شوائب الحديد والنيكل . |

الملحق II

التحليل الرياضي للمعادلات.

التحليل الرياضي للمعادلات الحفظ سابقة الذكر (الفصل II)؛ نطبق عليها طريقة الحجم المنتهية باستعمال شبكة مجال الحساب على ثلاثة أبعاد. الشكل 41 يوضح توزيع المواضع على أوجه الحجم العنصري تكون كالآتي:



الشكل 40: شبكة مجال الحساب على ثلاثة أبعاد.

1- معادلة انحفاظ كمية الحركة:

أ- على المحور z :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{w}{k} \right) + \rho g \beta (T \\ - T_{ref}) \end{aligned}$$

✓ حد الحمل الحراري (Le terme de convection) :

يتم مكاملة هذه الحد كتالي :

$$\begin{aligned} \int_s^n \int_w^e \int_q^m \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) r dr dz d\theta \\ = \rho \Delta V \left[\frac{w_p^{n+1} - w_p^n}{\Delta t} \right] + \rho [(Au)_n w_n - (Au)_s w_s] + \rho [(Aw)_e w_e - (Aw)_w w_w] + \\ \rho \left[(Av)_m w_m - (Av)_q w_q / r_p \right] \end{aligned} \quad (1)$$

نختصر بعض الثوابت في الترميزات التالية :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_n = \rho u A_n \\ C_s = \rho u A_s \\ C_e = \rho w A_e \\ C_w = \rho w A_w \\ C_m = \rho v A_m / r_p \\ C_q = \rho v A_q / r_p \\ C_t = \frac{\rho \Delta v}{\Delta t} \end{array} \right.$$

باستعمال نشر تايلور ل W_x ($x=e w n s m q$) من الدرجة الثانية من اجل تقريب السرعة إلى مركز السطح، هذا التقريب يعطي .[62] , [42] .(Schéma aux Différences Centrées CDS).

$$\left\{ \begin{array}{l} w_n = \frac{w_p + w_N}{2} \\ w_s = \frac{w_p + w_E}{2} \\ w_e = \frac{w_p + w_E}{2} \\ w_w = \frac{w_w + w_p}{2} \\ w_m = \frac{w_p + w_M}{2} \\ w_q = \frac{w_Q + w_p}{2} \end{array} \right.$$

إذن, عبارة المعرفة لحد الحمل الحراري الموافقة لتوزيع CDS هي :

$$\frac{1}{2}(C_e - C_w + C_n - C_s + C_m - C_q)w_p + \frac{C_n}{2}w_N - \frac{C_s}{2}w_S + \frac{C_e}{2}w_E - \frac{C_w}{2}w_W + \frac{C_m}{2}w_M - \frac{C_q}{2}w_Q C_t + \left[\frac{w_p^{n+1} - w_p^n}{\Delta t} \right] \quad (2)$$

✓ الحد الانتشار (le terme de diffusion):

مكاملة لحد الانتشار على الحجم العنصري يعطينا:

$$\int_s^n \int_w^e \int_q^m \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) r dr dz d\theta$$

$$= \left[\mu A_n \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_n - \mu A_s \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_s \right] + [\mu \Delta z w_n - \mu \Delta z w_s] + \left[\mu A_e \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_e - \mu A_w \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_w \right] + \left[\mu A_m \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_m - \mu A_q \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_q / r_p^2 \right] \quad (3)$$

المشتقات الجزئية $\left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_s, \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_e, \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_w, \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_m, \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_q \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_n$ هي مفرية بنشر تابلور من الدرجة الثانية لمختلف النقاط e, w, n, s, m, q .

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_n = \frac{w_p - w_N}{\Delta r} \\ \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_s = \frac{w_S - w_P}{\Delta r} \\ \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_e = \frac{w_p - w_E}{\Delta z} \\ \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_w = \frac{w_W - w_p}{\Delta z} \\ \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_m = \frac{w_p - w_M}{\Delta \theta} \\ \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_q = \frac{w_Q - w_p}{\Delta \theta} \end{array} \right.$$

نختصر بعض الثوابت في الترميزات التالية :

$$D_e = \frac{\mu A_e}{\Delta z}, D_w = \frac{\mu A_w}{\Delta z}, D_n = \frac{\mu A_n}{\Delta r}, D_s = \frac{\mu A_s}{\Delta r}, D_z = \frac{\mu \Delta z}{2}, D_m = \frac{\mu A_m}{\Delta \theta r_p^2}, D_q = \frac{\mu A_q}{\Delta \theta r_p^2}$$

إذن , العبارة (3) هي :

$$(D_e + D_w + D_n + D_s)w_p + (D_z - D_n)w_N - (D_z + D_s)w_S - D_e w_E - D_w w_W - D_m w_M - D_q w_Q \quad (4)$$

المكاملة لهذه الكمية على الحجم العنصري يعطينا

$$\int_s^n \int_w^e \int_q^m \left(-\frac{\mu}{k} w + -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \beta (T - T_{ref}) \right) r dr dz d\theta \\ = -\Delta V \frac{\mu}{k} w_p - (A_e p_e - A_w p_w) + \Delta V \rho g \beta (T_p - T_{ref}) \quad (5)$$

بإضافة العبارات 2، 4، 5 إلى معادلة كمية الحركة على المحور Z تصبح لنا المعادلة كالتالي:

$$C_t(w_p^{n+1} - w_p^n) = (D_e + D_w + D_n + D_s + D_m + D_q + \frac{1}{2}(-C_e + C_w - C_n + C_s - C_m + C_q) - \Delta V \frac{\mu}{k})w_p + \left(-\frac{C_n}{2} + D_z - D_n\right)w_N + \left(-\frac{C_s}{2} - D_z - D_s\right)w_S + \left(-\frac{C_e}{2} - D_e\right)w_E + \left(-\frac{C_w}{2} - D_w\right)w_W + \left(-\frac{C_m}{2} - D_m\right)w_M + \left(-\frac{C_q}{2} - D_q\right)w_Q - \frac{A_e}{2}p_E + \frac{A_w}{2}p_W + \Delta V \rho g \beta (T_p - T_{ref})$$

بتطبيق الخطط schéma implicite

$$w_p^n = -\frac{1}{C_t} \left((D_e + D_w + D_n + D_s + D_m + D_q + \frac{1}{2}(-C_e + C_w - C_n + C_s - C_m + C_q) - \Delta V \frac{\mu}{k} + C_t)w_p^{n+1} + \left(-\frac{C_n}{2} + D_z - D_n\right)w_N^{n+1} + \left(-\frac{C_s}{2} - D_z - D_s\right)w_S^{n+1} + \left(-\frac{C_e}{2} - D_e\right)w_E^{n+1} + \left(-\frac{C_w}{2} - D_w\right)w_W^{n+1} + \left(-\frac{C_m}{2} - D_m\right)w_M^{n+1} + \left(-\frac{C_q}{2} - D_q\right)w_Q^{n+1} - \frac{A_e}{2}P_E^{n+1} + \frac{A_w}{2}P_W^{n+1} + \Delta V \rho g \beta (T_p^{n+1} - T_{ref}) \right) \quad (6)$$

من أجل تبسيط المعادلة السابقة نكتب

$$w_p^n - \beta_1 = \alpha_1 w_N^{n+1} + \alpha_2 w_p^{n+1} + \alpha_3 w_S^{n+1} \quad (7)$$

حيث أن:

$$\alpha_1 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_n}{2} - D_z + D_n \right)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{C_t} \left(D_e - D_w - D_n - D_s - D_m - D_q - \frac{1}{2}(C_e - C_w + C_n - C_s - D_m - D_q) + \Delta V \frac{\mu}{k} - C_t \right)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_s}{2} + D_z + D_s \right)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{C_t} \left(\left(\frac{C_e}{2} + D_e \right) w_E^{n+1} + \left(\frac{C_w}{2} + D_w \right) w_W^{n+1} + \left(\frac{C_m}{2} + D_m \right) w_M^{n+1} + \left(\frac{C_q}{2} + D_q \right) w_Q^{n+1} + \frac{A_e}{2} P_E^{n+1} - \frac{A_w}{2} P_W^{n+1} - \Delta V \rho g \beta (T_p^{n+1} - T_{ref}) \right)$$

ب- على المحور r :بنفس الطريقة نكامل ونبسط المعادلة الحركة على المحور r فنحصل على المعادلة التالية

$$u_p^n - \beta_2 = \alpha_4 u_N^{n+1} + \alpha_5 u_p^{n+1} + \alpha_6 u_S^{n+1} \quad (8)$$

حيث أن:

$$\alpha_4 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_n}{2} + D_n \right)$$

$$\alpha_5 = -\frac{1}{C_t} (D_e + D_w + D_n + D_s + D_m + D_q + \frac{1}{2} (-C_e + C_w - C_n + C_s + D_m + D_q) - \Delta V \frac{\mu}{k} V_w + C_t)$$

$$\alpha_6 = \frac{1}{C_t} \left(\frac{C_s}{2} + D_s \right)$$

$$\beta_2 = -\frac{1}{C_t} \left(\left(-\frac{C_n}{2} + D_z - D_n \right) u_E^n + \left(-\frac{C_s}{2} - D_z - D_s \right) u_W^n + \left(-\frac{C_m}{2} - D_m \right) u_M^n + \left(-\frac{C_q}{2} - D_q \right) u_Q^n - \frac{A_n}{2} P_{N_E}^n + \frac{A_s}{2} P_S^n \right)$$

-2 معادلة الاستمرارية :

$$\int_S^n \int_w^e \int_m^q \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial v}{r \partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) r dr dz d\theta = 0$$

بنفس الكيفية لمعادلة كمية الحركة، نكامل ونبسط المعادلة الاستمرارية فنجد:

$$\rho \left[A_n \frac{u_p + u_N}{2} - A_s \frac{u_p + u_S}{2} \right] + \left[A_e \frac{w_p + w_E}{2} - A_w \frac{w_p + w_W}{2} \right] + \left[A_q \frac{v_p + v_Q}{2 r_p} - A_m \frac{v_p + v_M}{2 r_p} \right] = 0$$

$$-\left(\frac{A_n}{2} - \frac{A_s}{2} \right) u_p - \frac{A_n}{2} u_N + \frac{A_s}{2} u_S - \frac{A_e}{2} (w_E - w_W) + \frac{A_q}{2 r_p} v_M = \frac{A_q}{2 r_p} v_Q$$

$$v_Q = -\frac{2r_p}{A_q} \left(\left(\frac{A_n}{2} - \frac{A_s}{2} \right) u_p + \frac{A_n}{2} u_N - \frac{A_s}{2} u_S + \frac{A_e}{2} (w_E - w_W) - \frac{A_q}{2r_p} v_M \right) \quad (9)$$

بتطبيق الخطة schéma implicite

$$v_Q^n = -\frac{2r_p}{A_q} \left(\left(\frac{A_n}{2} - \frac{A_s}{2} \right) u_p^{n+1} + \frac{A_n}{2} u_N^{n+1} - \frac{A_s}{2} u_S^{n+1} + \frac{A_e}{2} (w_E^{n+1} - w_W^{n+1}) - \frac{A_q}{2r_p} v_M^{n+1} \right)$$

تبسيط معادلة الاستمرارية من أجل الحصول على معادلة السرعة على المحور θ :

$$v_Q^n = -\alpha_7 u_N^{n+1} - \alpha_8 u_p^{n+1} + \alpha_9 u_S^{n+1} - \alpha_{10} (w_E^{n+1} - w_W^{n+1}) + v_M^{n+1} \quad (10)$$

حيث أن

$$\alpha_7 = \frac{2r_p A_n}{A_q} \frac{1}{2}, \quad \alpha_8 = \frac{2r_p}{A_q} \left(\frac{A_n}{2} - \frac{A_s}{2} \right), \quad \alpha_9 = \frac{2r_p A_s}{A_q} \frac{1}{2}, \quad \alpha_{10} = \frac{2r_p A_e}{A_q} \frac{1}{2}$$

3- معادلة الطاقة:

$$\begin{aligned} & \int_s^n \int_w^e \int_m^q \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (u - V_w) \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{r \partial \theta} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) r dr dz d\theta = \\ & = \rho C_p \Delta V \left[\frac{T_p^{n+1} - T_p^n}{\Delta t} \right] + \rho C_p [A_n u_n T_n - A_s u_s T_s] - \rho C_p [A_n V_w T_n - A_s V_w T_s] + \\ & \rho C_p [A_e w_e T_e - A_w w_w T_w] + \frac{\rho C_p}{r_p} [A_q v_q T_q - A_m v_m T_m] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \int_s^n \int_w^e \int_m^q \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{r \partial r} + \frac{\partial^2 T}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) r dr dz d\theta + \int_s^n \int_w^e \int_m^q Q r dr dz d\theta = \\ & = \lambda \left[A_n \frac{T_p - T_N}{\Delta r} - A_s \frac{T_S - T_P}{\Delta r} \right] + \lambda \left[A_n \frac{T_p + T_N}{r_p} - A_s \frac{T_S + T_P}{r_p} \right] + \lambda \left[A_q \frac{T_p - T_Q}{r_p \Delta \theta} - \right. \\ & \left. A_m \frac{T_M - T_P}{r_p \Delta \theta} \right] + \lambda \left[A_e \frac{T_p - T_E}{\Delta z} - A_w \frac{T_W - T_P}{\Delta z} \right] + \Delta V Q_P \end{aligned} \quad (12)$$

بإضافة العبارتين 11 و 12 إلى معادلة الطاقة و تطبيق الخطة schéma implicite فنحصل على المعادلة التالية :

$$\begin{aligned}
T_p^n = \frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta V} & \left[\left(\frac{\rho C_p A_n u_n}{2} - \frac{\rho C_p A_s u_s}{2} - \frac{\rho C_p A_n V_w}{2} + \frac{\rho C_p A_s V_w}{2} + \frac{\rho C_p A_e w_e}{2} - \frac{\rho C_p A_w w_w}{2} - \right. \right. \\
& \left. \frac{\lambda A_n}{\Delta r} - \frac{\lambda A_s}{\Delta r} - 2 \cdot \frac{\lambda A_e}{\Delta z} + \frac{\rho C_p \Delta V}{\Delta t} \right) T_P^{n+1} + \left(\frac{\rho C_p A_n u_n}{2} - \frac{\rho C_p A_n V_w}{2} + \frac{\lambda A_n}{\Delta r} \right) T_N^{n+1} + \\
& \left(-\frac{\rho C_p A_s u_s}{2} + \frac{\rho C_p A_s V_w}{2} + \frac{\lambda A_s}{\Delta r} \right) T_S^{n+1} + \left(\frac{\rho C_p A_e w_e}{2} + \frac{\lambda A_e}{\Delta z} \right) T_E^{n+1} + \left(-\frac{\rho C_p A_w w_w}{2} + \right. \\
& \left. \frac{\lambda A_w}{\Delta z} \right) T_W^{n+1} - \Delta V Q_p^{n+1} \Big] \quad (13)
\end{aligned}$$

من أجل تبسيط المعادلة السابقة نكتب

$$T_p^n - \beta_3 = \alpha_{11} T_N^{n+1} + \alpha_{12} T_P^{n+1} + \alpha_{13} T_S^{n+1} \quad (14)$$

حيث أن:

$$\alpha_{11} = \frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta V} \left(\frac{\rho C_p A_n u_n}{2} - \frac{\rho C_p A_n V_w}{2} + \frac{\lambda A_n}{\Delta r} \right)$$

$$\begin{aligned}
\alpha_{12} = \frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta V} & \left(\frac{\rho C_p A_n u_n}{2} - \frac{\rho C_p A_s u_s}{2} - \frac{\rho C_p A_n V_w}{2} + \frac{\rho C_p A_s V_w}{2} + \frac{\rho C_p A_e w_e}{2} \right. \\
& \left. + \frac{\rho C_p A_w w_w}{2} - \frac{\lambda A_n}{\Delta r} - \frac{\lambda A_s}{\Delta r} - 2 \cdot \frac{\lambda A_e}{\Delta z} + \frac{\rho C_p \Delta V}{\Delta t} \right)
\end{aligned}$$

$$\alpha_{13} = \frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta V} \left(-\frac{\rho C_p A_s u_s}{2} + \frac{\rho C_p A_s V_w}{2} + \frac{\lambda A_s}{\Delta r} \right)$$

$$\beta_3 = \frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta V} \left(\left(\frac{\rho C_p A_e w_e}{2} + \frac{\lambda A_e}{\Delta z} \right) T_E^n + \left(-\frac{\rho C_p A_w w_w}{2} + \frac{\lambda A_w}{\Delta z} \right) T_W^n - \Delta V Q_p^n \right)$$

المراجع

المراجع

- 1 M. Bouzekri (2015); 'Soudage MAG dans l'industrie automobile'; Technique de l'Ingénieur, Réf : BM7731 v1.
- 2 R. Deroche, Soudage électrique des rails de chemins de fer, Technique de l'Ingénieur, Réf : BM 7780, 2006
- 3 J. P. Ferte (2006); 'Assemblage métallurgique dans la construction des turboréacteurs'; Techniques de l'ingénieur, Réf :BM7778.
- 4 R. Lévêque, J. Saleil, T. Cassagne (2013); 'Matériaux pour l'industrie pétrolière et gazière'; Matériaux & Techniques **101**, N06.
- 5 J. Volpp, F. Vollertsen (2013); 'Analytical modeling of the keyhole including multiple reflections for analysis of the influence of different laser intensity distributions on keyhole geometry'; Physics Procedia 41, pp453–461.
- 6 T. Zhang, C-S Wu et Y. Feng (2011); 'Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in keyhole plasma arc welding'; Numerical Heat Transfer, Part A:Applications: An International Journal of Computation and Methodology 60, pp685-698.
- 7 J. Wang, C. Wang, X. Meng, X. Hu, Y. Yu et S. Yu (2012); 'Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding'; Optics & Laser Technology 44, pp67–70.
- 8 H. Wang, Y. Shi, S. Gong (2007); 'Effect of pressure gradient driven convection in the molten pool during the deep penetration laser welding'; Journal of Materials Processing Technology 184, pp386–392.
- 9 H. Teng Lee, C. Te Chen et J. Lin Wu (2010); 'Numerical and experimental investigation into effect of temperature field on sensitization of Alloy 690 butt welds fabricated by gas tungsten arc welding and laser beam welding'; Journal of Materials Processing Technology 210, pp1636–1645.
- 10 A. Mahrle, J. Schmidt (2002); 'The influence of fluid flow phenomena on the laser beam welding process'; Int. J. Heat and Fluid Flow 23, pp288–297.
- 11 Y. Hu, X. He, G. Yu, Z. Ge, C. Zheng et W. Ning (2012); 'Heat and mass transfer in laser dissimilar welding of stainless steel and nickel'; Applied Surface Science 258, pp5914–5922.
- 12 X. He, PW. Fuerschbach et T. DebRoy (2003); 'Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel'; J. Phys. D: Appl. Phys 36, pp1388–1398.
- 13 K. Abderrazak, S. Bannour (2008); 'Numerical and experimental study of molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy'; Computational Materials Science **44** , pp 858–866.
- 14 K. Abderrazak, W. Ben Salem, H. Mhiri, P. Bounot, M. Autric (2009); 'Nd:YAG Laser Welding of AZ91 Magnesium Alloy for Aerospace Industries'; Metallurgical and Materials Transactions B. 40, 54-61. DOI: 10.1007/s11663-008-9218-7.
- 15 S. Bag, A. Trivedi , A. De (2009); 'Development of a finite element based heat transfer model for conduction mode laser spot welding process using an adaptive volumetric heat source'; International Journal of Thermal Sciences 48,pp1923–1931.
- 16 A. Otto, H. Koch et R. Gomez Vazquez (2012); ' Multiphysical simulation of laser material processing'; Physics Procedia 39, pp843–852.
- 17 G. Chartier. Les lasers, Collection technologies de pointe, Edition HERMES, (1990), p. 65.
- 18 W.M.STEEN (1991); 'Laser Material Processing'; Springer-Verlag London Ltd, ISBN 3-540-19670-6, 266
- 19 Publication de CETIM, Le soudage laser de faibles et moyennes épaisseurs, Monographie du club laser de puissance, 1ère édition, 44 p., 1992
- 20 A. Belhdj (2009); 'contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : application aux alliages de magnésium ;' Doctorat de l'Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis.

- 21 C. Ferdinand (2005); 'Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires'; Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse.
- 22 اختبارات اللحام في تخصص اللحام الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج / المملكة العربية السعودية
23 <https://ar.triangleinnovationhub.com/classification-welding-processes>
- 24 H.G. Fan a, H.L. Tsai, S.J. Nab (2001); 'Heat transfer and fluid flow in a partially or fully penetrated weld pool in gas tungsten arc welding'; International Journal of Heat and Mass Transfer 44, 417±428
- 25 T.Q. Li, C.S. Wu, Y.H. Feng, L.C. Zheng (2012); 'Modeling of the thermal fluid flow and keyhole shape in stationary plasma arc welding'; International Journal of Heat and Fluid Flow 34, pp117–125.
- 26 C.S. Wua , T. Zhang a, Y.H. Feng (2013); 'Numerical analysis of the heat and fluid flow in a weld pool with a dynamic keyhole'; International Journal of Heat and Fluid Flow 40 , 186–197
- 27 F. A. Jenkins. H E. White (2001); 'fundamentals of optics'; Mc Graw-Hill Higher Education, the United States of America.
- 28 M. Csele (2004); 'Fundamentals of light sources and lasers'; C.A Wiley-Inter science publication; Canada.
- 29 S. Guerrida (2012); 'Etude de la soudure au laser en industrie'; Mémoire de Master, Université de Ouargla.
- 30 http://ar.hb-weldingmachine.com/lb-aw-automatic-laser-welding-machine_pi.html
- 31 <https://www.elephant-cnc.com/pro/661-automatic-laser-welding-machine-for-metal/>.
- 32 <https://www.jncslaser.com/ar/product/200w-400w-yag-laser-welding-machine-for-mold.html>
- 33 <https://www.jncslaser.com/ar/product/3kw-handheld-fiber-laser-welding-cleaning-cutting-machine.html>
- 34 X. Cao, M. Jahazi, J.P. Immarigeon, W. Wallace (2006); 'A review of laser welding techniques for magnesium alloys'; Journal of Materials Processing Technology 171; 188–20
- 35 R. Cazes (1995); 'Soudage par faisceaux à haute énergie : faisceau d'électrons et laser'; Technique de l'ingénieur ; traité génie mécanique (centre France) (B7740).
- 36 L. Commin (2008); 'Assemblage des alliages de magnésium lamines à Chaud par soudage friction malaxage et soudage Laser - approche expérimentale vers une Compréhension des propriétés mécaniques'; Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.
- 37 B. Juckenath, M. Cantello, J. Breme and H.W. Bergmann (1988); 'Laser Welding of Titanium and Titanium Alloys'; Proceedings of the 6th World Conference on Titanium, Cannes, pp.1397-1402
- 38 G. Tirand, C. Arvieua, E. Lacostea, J-M. Quenisset (2013); 'Control of aluminium laser welding conditions with the help of numerical modelling'; Journal of Materials Processing Technology 213, 337– 348
- 39 S. Chiang, C. E. Albright (1988); 'Light-material interactions in laser material processing, Gas Flow and Chemical Lasers'; Proceedings, 7th international Symposium, Vienna, Austria, pp. 522-531, 22-26.
- 40 K. Abderrazak (2009); 'Etude expérimentale et numérique de la soudabilité des alliages de magnésium par laser'; Doctorat de l'Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis.
- 41 S. V. Patankar (1980); 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow'; Hemisphere Publishing Corporation, United States of America.
- 42 I. Popa (2002); 'Modélisation numérique du transfert thermique - méthode des volumes finis, Maison d'édition Universitaria, Craiova, ISBN : 973-8043-111-1
- 43 G Tirand (2012); 'Etude des conditions de soudage laser d'alliages base aluminium par voie expérimentale et a l'aide d'une simulation numérique'; Ecole doctorale des sciences physiques pour l'ingénieur. Université Bordeaux.
- 44 H. Zhao and T. Debroy (2001); 'Weld Metal Composition Change during Conduction Mode Laser welding of Aluminum Alloy 5182'; Metallurgical and materials transactions B, Vol. 32 B, 172
- 45 P. Okon, G. Dearden, K. Watkins, M. Sharp and P. French (2002); 'Laser welding of aluminium 5083'; 21st international Congress on applications of lasers and Electro-Optics, Scottsdale, ISBN 0-912035-72-2

- 46 S. Lemkeddem, F. Khelfaoui, O. Babahani (2018); 'Calculation of energy lost by radiation and convection during laser welding of TA6V titanium alloy'; *Journal of Theoretical and Applied Physics*; 12: 113–120.
- 47 W. Piekarska , M. Kubiak (2011); 'Three-dimensional model for numerical analysis of thermal phenomena in laser–arhybrid welding process'; *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, 4966–4974
- 48 J. Goldak, A. Chakravati, M. Bibby (1984); 'A new finite element model for welding heat sources'; *Metallurgical Transactions*. 15B, 299-305.
- 49 S. Bannour, K. Abderrazak, H. Mhiri, et al.(2012); 'Effects of temperature dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91magnesium alloy'; *Optics & Laser Technology*; 44: 2459–2468.
- 50 L. Billaud (1997); 'magnésium et alliages de magnésium'; *matériaux métallique*, DUNOD, décembre.
- 51 ANFOR (2000); 'Industrie aérospatiale - Assemblages soudés et brasés pour constructions aérospatiales. - Assemblages de matériaux métalliques soudés par faisceaux laser. - Qualité des assemblages soudés'; NF L06-395, Paris.
- 52 B.L. Mordike and T. Ebert (2001); 'Magnesium: Properties —applications — potential'; *Materials Science and Engineering A302*, pp. 37-45.
- 53 F. Stauder (2004); 'le magnésium dans l'automobile, fiche technique automobile'; février
- 54 D. Reid, Applications du magnésium - Hydro Magnesium, 6ième colloque sur les métaux légers, Association des Métaux Légers, Mai 2004, Trois-Rivières.
- 55 E .A Spiegel, G. Veronis (1959);'On the Boussinesq approximation for a compressible fluide ;' *Astrophysical Journal*, Vol. **131**, p.442.
- 56 S. Sire (2002); 'Etude de la formation du bain de fusion en soudage TIG en présence d'un dépôt de silice – application au soudage ATIG des aciers au carbone et FBTIG des alliages d'aluminium'; Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes. 162.
- 57 T. Zacharia, SA. David, JM. Vitek, T. Debroy (1989); 'Weld pool development during GTA and laser beam welding of type 304 stainless steel'; *PartI—theoretical analysis. Weld JRes Supply*: 499–509.
- 58 Pa. Rajesh Kannan, Va. Muthupandi, and Kb. Devakumaran (2018); 'On the effect of temperature coefficient of surface tension on shape and geometry of weld beads in hot wire gas tungsten arc welding process *Materials Today*'; *Proceedings* 5, 7845–7852.
- 59 S. Guerrida, F. Khelfaoui, S.Lemkeddem, K. Telib & Z.Ballah (2022); 'Calculation of spatial and temporal distributions of temperature and velocity of a weld pool during laser welding'; *Welding International*, 36:6, 344-354, DOI:10.1080/09507116.2022.2082341.
- 60 D. Bennon, F.P. Incropera (1987);' A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid–liquid phase change systems-1 model formulation;' *Int. J. Heat Mass Transfer*, **30** (10) 2161–2170.
- 61 C. Vanhille; A. Lavie et C. Campos-Pozuelo (2007); 'Modélisation numérique en mécanique'; Lavoisier.
- 62 H. K. Versteeg & Wmalalase (1995); 'An introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite volume method, LONGMAN, Angland.
- 63 F.H. Froes, D. Eliezer, E. Aghor (1998); 'The science, technology, and applications of magnesium'; *JOM* 50 (9) 30–34.
- 64 AG. Grigoryants, VA. Grezev (2014); 'Special features of laser welding using fibre and CO₂ lasers'; *Weld Int*; 67(12):17–24.
- 65 <https://ar.wikipedia.org/wiki/>
- 66 <https://www.marefa.org>

دراسة سلوك المائع والسلوك الحراري عند لحام قطعتين معدنيتين بالليزر

الملخص: تعتبر عملية اللحام بالليزر واحدة من أكثر العمليات استخدامًا في الصناعة. تلعب دراسة توزيعات درجة الحرارة وسرعة المائع في بركة اللحام دورًا مهمًا في تحديد حجم وشكل اللحام. في هذا البحث، نتمتع بالدراسة العددية لظاهرة اللحام في بركة اللحام الناتجة عن تفاعل شعاع الليزر مع سبيكة المغنيزيوم (AZ91). نستخدم معادلات الحفظ: الطاقة، كمية الحركة، الاستمرارية ومعادلة طاقة لمرحلة تغير الطور؛ أخذنا في الاعتبار تأثير Marangoni وقوة الطفو. بالنسبة للنموذج العددي، نستخدم طريقة الحجم المنتهية (FVM) وطريقة Gauss-Seidel التكرارية. نحسب التوزيعات المكانية والزمنية لدرجة الحرارة وسرعة المائع في نظام الإحداثيات الأسطوانية (r, θ, Z) . ندرس كيف تؤثر استطاعة الليزر وسرعة اللحام على عرض وعمق بركة اللحام. تمت مقارنة نتائج هذا النموذج العددي مع دراسة تجريبية.

الكلمات الدالة: اللحام بالليزر، نموذج المائع، طريقة الحجم المنتهية (FVM) وطريقة Gauss-Seidel التكرارية توزيع درجة الحرارة، بركة اللحام.

Study of fluid behavior and thermal behavior when welding two metal pieces with a laser

Abstract: The laser welding process is one of the most widely used processes in industry. The study of the distributions of temperature and fluid velocity in the weld pool plays an important role in determining the size and the shape of the weld. In this thesis, we are interested on the numerical study of welding phenomenon in weld pool resulting from the interaction of laser beam with a magnesium alloy (AZ91). We use the equation of energy, the equations of conservation of movement, the equation of continuity and the equation of phase transition energy; we take into account effect of Marangoni and buoyancy force. For the numerical model, we use the Finite Volumes Method (FVM) and Gauss-Seidel iterative method. We calculate spatial and temporal distributions of temperature and fluid velocity in cylindrical coordinates system (r, θ, z) . We study how laser Power and welding speed affect the width and the depth of the weld pool. The results of this numerical model are compared with an experimental study.

KEYWORDS: Laser welding, Fluid model, Finite Volumes Method (FVM), Gauss-Seidel iterative method, Temperature distribution, Weld pool.

Etude du comportement fluide et thermique lors du soudage de deux pièces métalliques au laser

Résumé : Le procédé de soudage au laser est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie. L'étude des distributions de température et de vitesse du fluide dans le bain de fusion joue un rôle important dans la détermination de la taille et de la forme de la soudure. Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'étude numérique du phénomène de soudage du bain de soudure résultant de l'interaction d'un faisceau laser avec un alliage de magnésium (AZ91). On utilise l'équation de l'énergie, les équations de conservation du mouvement, l'équation de continuité et l'équation de l'énergie de transition de phase ; nous prenons en compte l'effet de Marangoni et la force de flottabilité. Pour le modèle numérique, nous utilisons la Méthode des Volumes Finis (FVM) et la méthode itérative de Gauss-Seidel. Nous calculons les distributions spatiales et temporelles de la température et de la vitesse du fluide dans le système de coordonnées cylindriques (r, θ, z) . Nous étudions comment la puissance du laser et la vitesse de soudage affectent la largeur et la profondeur du bain de soudure. Les résultats de ce modèle numérique sont comparés à une étude expérimentale.

MOTS CLÉS: Soudage laser, Modèle de fluide, Méthode des Volumes Finis (FVM), Méthode itérative de Gauss-Seidel, Distribution de température, Bain de fusion.