

Ministry of Higher Education  
and Scientific Research  
University of Baghdad



# Evaluation of Weld Bead Width and Strength of PMMA Joining to st.st.304 using Pulsed Nd:YAG Laser

A thesis Submitted to the Institute of Laser for  
Postgraduate Studies, University of Baghdad in Partial  
Fulfillment of Requirements for the Degree of Doctor of  
Philosophy in Laser – Mechanical Engineering.

**By**

**Furat Ibrahim Hussein Al-Najjar**

**2013 AD  
AH**

**1434**

## Abstract

This work involves studying the potential of laser direct overlapped joining between transparent polymethacrylate (PMMA) and stainless steel 304 (st.st.304) sheets using a pulsed mode Nd:YAG laser. This modality of joining, to the best of our knowledge, is investigated for the first time. The process was done in two modes according to the direction of laser irradiation. These modes are laser transmission joining (LTJ) and conduction joining (CJ). The former mode is achieved when the joint is irradiated from the polymer side and the latter mode when the joint is irradiated from the opposite side (metal side). Many working parameters were employed in this work covering the pulsed light and process parameters. Peak power ( $P_p$ ), pulse duration ( $\tau$ ), pulse repetition rate (PRR), scanning speed ( $v$ ) and pulse shape were manipulated to see their effects on the joint strength ( $F_b$ ), joint bead width ( $b$ ), joint quality and appearance.

The first phase of the investigation was based on one factor at a time method (OFM) as an experimental method. The best results obtained for the joint strength and bead width for both cases LTJ and CJ are 925 N, 7.25 mm and 495 N, 8 mm respectively. The process conditions in this method are  $P_p=3$  kW,  $\tau=5$  ms, PRR= 20 Hz for CJ and 25 Hz for LTJ,  $v=4$  mm/s and rectangular pulse shape (RC). The best results of OFM in the investigation were considered according to best joint quality, highest joint strength and minimum bead width.

The second phase of the investigation was carried out with design of experiments method (DOE) based on response surface methodology (RSM) as an empirical modeling. RSM was used to optimize the experimentally obtained data, to build mathematical models for correlating the working parameters ( $P_p$ ,  $\tau$ , PRR and  $v$ ) and the responses ( $F_b$  and  $b$ ) and to investigate the interaction between different parameters and their effect on the responses. The predicted values obtained by the mathematical model in RSM methodology are in good

agreement with the actual values. The obtained response surface graphs and contour graphs offer the exploration of the best combination of working parameters that give the optimum results of joint strength and bead width.

The third phase of the investigation was based on ANSYS® simulation based on finite element method (FEM) as an ab-initio modeling. ANSYS® simulation was used to apply spatial and temporal thermal analysis for the joints and fully explore the thermal environment of the joints during joining (heating time) and after joining (cooling time). The same process conditions for both modes (CJ and LTJ) are applied in ANSYS® simulation and IR thermography. The conditions are  $P_p=3$  kW,  $\tau=5$  ms, PRR= 20 Hz and  $v=4$  mm/s.

IR thermography by means of IR thermal camera was used for in-process monitoring and taking thermal image during joining. The taken images were used for ANSYS® simulation results validation. The results of IR imaging and ANSYS® simulation were in close outcome. The computational results of CJ show that the PMMA/st.st.304 interface temperature is 975 °C at the laser spot center line during heating. Also, a temperature of 1200 °C for the joint upper surface (metal side) at the laser spot center line is obtained from the computational work versus 1150 °C in the case of IR imaging results. In LTJ the computational results show PMMA/st.st.304 interface temperature of 650 °C at the laser spot center line versus 825 °C for the IR imaging results. The reason of the incorrect results in LTJ is related to the type of joint mode configuration which results in the problems of IR radiation absorption by the PMMA. It is found that the monitoring of LTJ mode with IR thermography is not a correct choice.



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
جامعة بغداد

## تقييم عرض الدرزة وشدة ربط PMMA الى st.st.304 بأستخدام ليزر Nd:YAG النبضي

اطروحة مقدمة الى معهد الليزر للدراسات العليا - جامعة بغداد  
لاستكمال متطلبات نيل درجة دكتوراه فلسفة في الليزر - هندسة ميكانيكية

قدمت من قبل

فوات ابواهيم حسين النجار

## الخلاصة

هذا العمل يتضمن دراسة امكانات الوبط التراكبي المباشر بين بوليمر البولي مثيل ميثاأكريلات PMMA و الفولاذ المقاوم للصدأ AISI st.st.304 باستخدام ليزر الأندياك ذو النمط النبضي. هذا الطراز من الربط ، الى حد علمنا قد بحث للمرة الأولى . انجزت العملية بنمطين اعتمادا على اتجاه تشعيع الليزر . هذان النمطان هما الربط بلنفوذ الليزري (LTJ) و الربط التوصيلي (CJ). انجز النمط الأول عندما شععت الوصلة من جهة البوليمر اما الاخر انجز عندما شععت الوصلة من الاتجاه المعاكس (جهة المعدن). استخدمت عدة معلمات تشغيل في هذا العمل شاملة معلمات الضوء النبضي و معلمات العملية . تمت المناورة بالقدرة العظمى ( $P_p$ ) و زمن النبضة ( $\tau$ ) و سرعة المسح ( $v$ ) و معدل تكرار النبضة (PRR) وشكل النبضة لملاحظة تأثيرهم المشترك على قوة الوصلة و عرض الدرزة و جودة ومظهر الوصلة.

اسست الصفحة الأولى في هذه الدراسة على طريقة تغيير المعلم لمرة واحدة في كل مرة (OFM) كأسلوب تجريبي. أفضل النتائج المستحصلة لقوة الوصلة و عرض الدرزة ولكلا النمطين LTJ و CJ هي قوة وصلة  $F_b = 925 \text{ N}$  و عرض درزة  $b = 7.25 \text{ mm}$  لنمط الربط بلنفوذ الليزري (LTJ) و قوة وصلة  $F_b = 495 \text{ N}$  و عرض درزة  $b = 8 \text{ mm}$  لنمط الربط التوصيلي (CJ). ان شروط العملية لهذه الطريقة هي القدرة العظمى للنبضة ( $P_p = 3 \text{ كيلو واط}$ ) و زمن النبضة ( $\tau = 5 \text{ ملي ثانية}$ ) و معدل تكرار النبضة (PRR)  $= 20$  هيرتز للربط التوصيلي و  $25$  هيرتز للربط النفوذ الليزري و سرعة المسح ( $v = 4 \text{ ملم/ثانية}$ ) وباستخدام شكل النبضة المستطيل نوع RC. اخذت افضل النتائج لطريقة OFM في هذه الدراسة طبقا معايير افضل نوعية ربط و أعلى قوة وصلة و أقل عرض درزة.

اسست الصفحة الثانية في هذه الدراسة على منهجية سطح الاستجابة (RSM) كنموذج وضعية. استخدمت RSM لغرض تحسين البيانات التجريبية المستحصلة ولبناء نماذج رياضية لغرض الترابط بين معلمات التشغيل والاستجابات ( $F_b$  and  $b$ ) ولدراسة التفاعل بين معلمات مختلفة وتأثيرهم على الاستجابات. توافقت القيم المستحصلة من النماذج الرياضية في منهجية RSM جيدا مع القيم الحقيقية . تقدم الرسوم البيانية لسطوح الاستجابة و الرسومات البيانية المحيطة كشف لأحسن تشكيلة من المعلمات التي تعطي افضل النتائج لقوة الوصلة وعرض الدرزة.

اسست الصفحة الثالثة في هذه الدراسة على محاكاة الأنسيس (ANSYS®) المبنية على العناصر المحددة (FEM) كنموذج على أسس أولية (ab-initio). استخدمت محاكاة الأنسيس لتطبيق تحليل حراري مكاني وزماني للوصلة وللاستكشاف كليا البيئة الحرارية للوصلات اثناء الربط (وقت التسخين) و بعد الربط (بعد التسخين). طبقت نفس شروط العملية لكلا النمطين (CJ and LTJ) في محاكاة الأنسيس و التصوير الحراري . شروط العملية هي

القدرة العظمى للنبضة  $(P_p) = 3$  كيلو واط و زمن النبضة  $(\tau) = 5$  ملي ثانية و معدل تكرار

النبضة  $(PRR) = 20$  هيرتز و سرعة المسح  $(v) = 4$  ملم/ثانية.

أستخدم التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء (IR thermography)

بواسطة الكاميرا الحرارية في المراقبة أثناء العملية وأخذت صور حرارية خلال الربط .

استخدمت الصور المأخوذة للتحقق من نتائج محاكاة الأنسيس. كانت نتائج التصوير الحراري و

محاكاة الأنسيس ذات حصة متقاربة. أظهرت النتائج الحاسوبية للنمط التوصيلي CJ بأن درجة

حرارة السطح الوسطي (PMMA/st.st.304) هي 975 درجة مئوية عند الخط المحوري

لنقطة الليزر أثناء التسخين . أيضا استحصلت درجة حرارة 1200 درجة مئوية للسطح العلوي

للوصلة (على سطح المعدن) عند الخط المحوري لنقطة الليزر بمقابل 1150 درجة مئوية في

حالة نتائج التصوير الحراري . أظهرت النتائج الحاسوبية للربط بالنفوذ الليزري بأن درجة

حرارة السطح الوسطي (PMMA/st.st.304) هي 650 درجة مئوية عند الخط المحوري

لنقطة الليزر بمقابل 825 درجة مئوية في حالة نتائج التصوير الحراري. يتعلق سبب عدم تطابق

النتائج بهيئة نمط الربط الذي يؤدي الى مشاكل امتصاص الأشعة تحت الحمراء بواسطة

البوليمر. استنتج بأن مراقبة نمط الربط بالنفوذ الليزري بالتصوير الحراري بالأشعة تحت

الحمراء ليس بالخيار الصحيح.