مزايا قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) في صب البرونز
(دراسة نظرية)

ا.م.د/ ضياء عوض أحمد أبو العطا
أستاذ الخزف المساعد
كلية الفنون الجميلة – جامعة المنيا

المستخلص :

من المشكلات التي تواجه معظم الفنانين عند تجهيز قوالب لصب المعادن هو إشكالية صلابة جدار القالب لكي يتحمل المعدن أثناء الصب وهو في حالة انصهار بجانب امكانية السماح للمعدن بالتبريد وعمليات التمدد الحراري الذي يجب أن يكون منخفض للحد من التغيرات في أبعاد جدار القالب، وبالتالي في عملية الصب ، كما يؤدى تنوع السبائك المستخدمة في الصب وحجم وتعقيد المسبوكات، والمتطلبات المحددة لمكونات الصب إلى مجموعة متنوعة من خصائص ومواد القالب تستخدم جميعها لأغراض محددة في صناعة الصب حيث تعتبر هي العامل الأساسي للمتطلبات الدقيقة لإنتاج صب ناجح .

افترض البحث الحالي أن التعامل بقوالب الصدفة الخزفية في صب تماثيل البرونز أفضل من القوالب التقليدية ، وهدف البحث الحالي الى التعريف بمزايا قوالب الصدفة الخزفية في مجال صب تماثيل البرونز ، بجانب توضيح كيفية وآلية طرق الحصول على قوالب الصدفة الخزفية ، وجاءت أهمية البحث الحالي في تقديم الخبرة الكافية لجموع النحاتين الشباب الناشئين حول طرق الاستفادة من مزايا قوالب الصدفة الخزفية في تماثيل البرونز ، بجانب تسليط الضوء على طرق حديثة في مجال صب تماثيل النحت الميداني ، واقتصر البحث الحالي في الحدود على نوع قوالب الصدفة الخزفية دون الأنواع الأخرى ، وعلى طريقة صب خامة البرونز دون الخامات الأخرى .

كما تعرض البحث لبعض التعريفات الإجرائية لمصطلحات البحث مثل القوالب والصدفة والصب والبرونز كما تم عرض المتطلبات الرئيسية لقالب الصب الفني والاستثماري ، وعوامل نجاح انتاج قوالب من الصدفة ، مكونات خلطة قوالب الصدفة الخزفية ، مزايا استخدام قوالب الصدفة الخزفية في صب معدن البرونز ، مراحل تنفيذ قوالب الصدفة الخزفية ، خامات تركيب البرونز ومميزات سبيكة البرونز وما هي خطوات ومتطلبات صب البرونز ، وتم استعراض نتائج البحث والتوصيات .

كلمات مفتاحية : القوالب ، الصدفة الخزفية ، الصب ، البرونز .

Advantages of Ceramic Shell Molds in Bronze Casting (Theoretical Study)

Abstract:

One of the challenges facing many casting companies is the difficulty of ensuring that the metal is properly hardened during casting, even when it is in a molten state. This is because the metal begins to cool and expand during the casting process, which must be kept low from the very beginning. In Heidelberg, this is particularly true during the casting process. The variety of alloys used in casting, but the limited castings and the specific requirements for casting components, lead to a variety of properties, all of which are always specified in the casting industry, as this is the primary factor in determining the precise requirements for development.

The current study hypothesized that using ceramic shell molds in bronze casting is superior to traditional molds. The current study aimed to identify the advantages of bronze shell molds in bronze casting, as well as to explore local methods for ceramic shell molds. The need for the current study arose to provide expertise to emerging young sculptors, highlighting the benefits of shell molds in bronze shell molds and highlighting modern methods in Chinese shell molds. The current study was limited to shell molds made from other types, and it also limited the method of casting bronze to the exclusion of other materials.

Some operational definitions of search terms such as molds, shells, casting, and bronze were also sought. The key requirements for difficult casting molds were also presented, as were success factors for shell mold production. The components of Chinese shell mold mixing were also presented, as were the advantages of using shell molds in bronze casting. The stages of shell mold production were also discussed, as were the composition materials for bronze, the characteristics of bronze alloys, and the requirements for bronze casting. The research findings and recommendations were also included.

Keywords: molds, ceramic shell, casting, bronze.

مقدمة :

منذ الألفية الرابعة قبل الميلاد استخدمت الحضارات المختلفة حول العالم البرونز وسبائك النحاس الأخرى لإنتاج أشكال نحتية ، وحديثاً تقوم العديد من مراكز الأبحاث بدراسة المنحوتات البرونزية القديمة الفريدة لتعزيز فهم أكثر حول تقنيات الأشخاص الذين ساهموا في إبداعها، والتعرف على تاريخ مراحل تطور تقنيات نحت سبائك النحاس.

لقد كانت عملية صب المعادن السائلة لإنتاج أجسام صلبة عملية تصنيعية تمارس منذ أكثر من ٥٠٠٠ عام، لقد ظل البرونز طوال تاريخ اليونان مادة أثيرة لصنع التماثيل ، إذ كانت التماثيل البرونزية الباكرة تصنع من رقائق مطرقة من معدن البرونز تثبت فوق هيكل خشبي ، ثم استخدمت بعد ذلك عمليات صب المعدن بطريقة الصب المصمت المجسم من قطعة واحدة التي تلائم التماثيل الصغيرة ، وبطريقة المصبوبات الجوفاء التي مارسها المصريون في العصور المبكرة والتي تناسب التماثيل الكبيرة خلال القرنين السابع والسادس ق.م، كما استخدمت عمليات الصب بطريقة الشمع المتبدد وصياغة القوالب الرملية على حد سواء[١]، وفي حضارة فارس احتلت صناعة البرونز مكانة كبيرة في صناعة الأثاث والتماثيل الصغيرة.[٢]

ويعد الصب الاستثماري لإنتاج مصبوبات هندسية معدنية باستخدام نمط قابل للاستهلاك داخل غلاف خزفي من أقدم طرق تشكيل المعادن المعروفة ، وتتميز هذه التقنية نفسها بمزايا هائلة في إنتاج مكونات عالية الجودة، مع فوائد رئيسية تتمثل في الدقة والتنوع والسلامة المعدنية ونتيجة لذلك تعد هذه العملية من أكثر الطرق اقتصادية ومع ذلك فقد دفعت الضغوط البيئية والاقتصادية هذه الصناعة إلى تحسين جودة الصب الحالية وخفض تكاليف التصنيع، واستكشاف أسواق جديدة لهذه العملية في الوقت الحاضر.

ويعد إنتاج مكونات معدنية دقيقة ومعقدة مناسبة لتطبيقات الطيران والفضاء، ومؤخراً في الأجزاء البشرية مثل تيجان الأسنان والأطراف الصناعية المخصصة التي يمكن تصنيعها من العديد من السبائك المعدنية ، كل ما سبق أصبح من الاهتمامات الرئيسية للعديد من مجموعات البحث العلمية في هذا المجال ، وتقام باستمرار داخل المتاحف العريقة ومراكز الأبحاث والدراسات الأثرية مبادرات لتعزيز البحث في تطوير وتبادل الأفكار والتقنيات المتعلقة بصناعة البرونز في العديد من دول العالم على يد فنانين متخصصين متعددي التخصصات للمشاركة في تبادل الخبرات مما يؤدي الى فهم أكثر لفن النحت البرونزي من خلال استخدام مفردات وبروتوكولات مشتركة للجوانب التقنية للدراسات الفنية ، كما تضم فرق الأبحاث مرممين وعلماء وأمناء متاحف ومؤرخين فنيين وعلماء آثار وخبراء معادن وحرفيين يدرسون إنتاج

[١] - ثروت عكاشة ٢٠١٣م : الفن الإغريقي ، الهيئة المصرية العامة للكتاب ، الطبعة الثانية ، ص ٢٩٣ .
[٢] - ثروت عكاشة ١٩٩٠ : الفن الفارسي القديم ، دار المستقبل العربي ، الطبعة الأولى ، ص ١٥٣

البرونز في عصور وثقافات مختلفة لصالح المتاحف ومؤسسات التراث الثقافي والباحثين في الجامعات .

وتتعاون المعارض والمتاحف العالمية حالياً أمثال متحف اللوفر باريس، ومتحف متروبوليتان للفنون بيويورك، ومتحف جيه بول جيتي بلوس أنجلوس في اجراء المزيد من ورش العمل حول تقنيات صب لتماثيل البرونز من النحت الفرنسي من عصر النهضة إلى عصر الثورة .[١]

الغرض من هذه الإجراءات هو دراسة وتفسير وتوثيق عملية تصنيع الأعمال الفنية النحتية المصنوعة من سبائك النحاس المصبوب ، كما تتيح أيضا معرفة المبادئ التوجيهية للأسباب المختلفة لطبيعة تقنيات تصنيع منحوتات البرونز بجانب التعرف على دورة حياة البرونز والعلامات الدالة ليس فقط عن مراحل إنتاجها بل غالبا على عمرها الطويل ومعرفة طبيعة الأدلة المتباينة التي قد يحتويها منحوتة برونزية ومن خلال معرفة الجذور التاريخية للدراسة التكنولوجية للبرونز .[٢]

ونتيجة للطلب المتزايد على مختلف القطاعات الصناعية يشهد قطاع الصب حاليًا ضغطًا هائلًا لتلبية الإحتياجات تجاه العديد من المعادن ، لذا يتم اختيار أفضلها من حيث مقاومه التآكل، وقوة التحمل ، والتوافق الحيوي، والقدرته على التعقيم ...الخ ، ولتحقيق هذا الهدف تعد تقنية الصب الاستثماري الخيار الأمثل لذا يجب مراعاة انخفاض سيولة المعدن، مع أجواء الانصهار كما يجب التغلب على أي عوائق للحصول على قطع عالية الجودة بنجاح من القطع الفنية من خلال ملائمة القوة الميكانيكية للقالب والنفاذية، والتغيرات البعدية، والبنية المجهرية للقوالب الخزفية وهي خصائص أساسية لجودة المسبوكات.[٣]

ونتيجة للمزايا العديدة والكثيرة للقوالب المصنوعة بإسلوب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) في مجال الإنتاج الصناعي تم الإستعانة بالروبوتات لتقوم بهذه الوظيفة الآلية التي تضمن السرعة والسهولة والجودة المطلوبة ، وكانت أنظمة الروبوتات جزءًا من العملية منذ بداياتها وشمل التطور برمجة الروبوتات للقيام بتقنيات غمس وتصريف فريدة للقوالب حيث يمكن أن تكون فريدة لكل حالة غمس أثناء بناء هيكل القالب الذي يعتمد على البرنامج مقارنة بالروبوت نفسه.

1 - Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture Edited by David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, and Peta Motture J. PAUL GETTY MUSEUM, LOS ANGELES

٢ - Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture Edited by David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, and Peta Motture J. PAUL GETTY MUSEUM, LOS ANGELES

٣ - https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2013/data/papers/3998.pdf

مشكلة البحث الحالي :

لقد تطورت فكرة القوالب عامة وتطورت معها قوالب القشرة أو الصدفة الخزفي حيث حلت أنظمة المواد الرابطة القائمة على الكحول مكان المواد الرابطة القائمة على الماء ، وتوافرت مواد رابطة وأنظمة مخصصة للتطبيقات الأساسية والاحتياطية ، مع وجود البوليمرات التي كان من فوائدها تسريع تجفيف الغلاف ، زيادة الالتصاق ، زيادة قوة الالتصاق ، مع تواجد أيضاً الألياف التي ساعدت على زيادة معدل البناء ، تحسين الاحتفاظ بالطين على الحواف ، تقوية الغلاف ، تقليل عدد الطبقات المطلوب .

من المشكلات التي تواجه معظم الفنانين عند تجهيز قوالب لصب المعادن هو صلابة جدار القالب لكي يتحمل المعدن أثناء الصب وهو في حالة انصهار بجانب امكانية السماح للمعدن بالتبريد ، وكذلك عمليات التمدد الحراري الذي يجب أن يكون منخفض للحد من التغيرات في أبعاد جدار القالب، وبالتالي في عملية الصب ، كما يؤدى تنوع السبائك المستخدمة في الصب وحجم وتعقيد المسبوكات، والمتطلبات المحددة لمكونات الصب، إلى مجموعة متنوعة من خصائص ومواد القالب، تُستخدم جميعها لأغراض محددة في صناعة الصب ، العامل الأساسي في جميع الحالات هو النطاق الواسع للمتطلبات الدقيقة لإنتاج عملية صب ناجح .

ويوفر قالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) العديد من المميزات التي تجعله هاماُ لدى العديد من النحاتين الشباب للإستفاده منه في انتاج منحوتاتهم الفنية والاستثمارية حيث تتم عملية صنع القالب من خلال غمس النموذج الشمعي في عجينة مكونة من مسحوق خزفي ومادة رابطة غروية، ويرش بمسحوق حراري ناعم وخشن ويجفف بعد تكرار هذه الخطوات لانتاج قالب من الصدفة الخزفية ذي متانة كافية ويحرق النموذج "الشمع" وتسكب السبيكة المعدنية في الغلاف الخزفي بعد إزالة قالب الصدفة الخزفية .

من مزايا قوالب الصدفة الخزفية هو الحصول على قالب خفيف وبسهولة وفي وقت قصير مما يتيح الإنتاج الفني والإستثماري ويتحمل درجات حرارة مصهور المعدن الساخن وبنتائج لا تحتاج وقت طويل في تشطيب سطحي ممتاز ، من العرض السابق يمكننا صياغة البحث الحالي في السؤال التالي :

س: هل يمكن لقوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) انتاج تماثيل برونز بدون تشطيب؟

فرض البحث : يفترض البحث الحالي أن :

١- قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) أفضل في صب البرونز من القوالب التقليدية.

هدف البحث : يهدف البحث الحالي الى :

١- التعريف بمزايا قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) في مجال صب تماثيل البرونز .

٢- توضيح كيفية وآلية طرق الحصول على قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell).

أهمية البحث :

١- تقديم الخبرة الكافية لجموع النحاتين الشباب الناشئين حول طرق الاستفادة من مزايا قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) في تماثيل البرونز .

٢- تسليط الضوء على طرق حديثة في مجال صب تماثيل النحت الميداني .

حدود البحث : يقتصر البحث الحالي على :

١- قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) دون الأنواع الأخرى من القوالب .

٢- صب خامة البرونز دون الخامات الأخرى .

مصطلحات البحث :

القوالب (Moldes) : تعريف إجرائي

هي مرحلة يقوم بها الفنان لإنتاج عمله الفني من قالب سالب بعد التشكيل على خامة سهلة كالطين ليصب فيها الشكل النهائي الموجب من أحد الخامات المعدنية المصهورة والتي يصعب تشكيلها في الحالة الطبيعية ، والقوالب تساعد الصانع استثمارياً للحصول على عدة نسخ من القطعة الفنية التي يريد أن يحصل منها على عدة نسخ مكررة ، وتتم صناعة القوالب بخامات مختلفة تتوقف على حسب نوع المنتج الفني المطلوب ، والقالب هو ما تفرغ فيه المعادن وغيرها ليكون مثالًا طبق الأصل لما يصاغ منها .

الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) : تعريف إجرائي

هي أحد أنواع القوالب التي انتشرت حديثاً في مجال صناعة وصب المجسمات كتلة واحدة بدون عمل أجزاء وبنسبة انكماش لا تذكر ، وتمتاز بخفة وزنها وجودة المنتجات التي تخرج منها بتفاصيل عالية الدقة وتشطيب سطحي ممتاز ، ومقاوم للصدمات الحرارية عند صب أي أحد أنواع المعادن كالنحاس والألومنيوم والتيتانيوم والكروم وغيرها من السبائك .

الصب (Casting) : تعريف إجرائي

هي عملية تفريغ سائل معين في قالب لصنع شيء ما ، وغالباً ما تتم عن طريق صب معدن منصهر أو مادة أخرى في قالب ، وهي عملية فنية يمارسها معظم الفنانين في مجال النحت وبعض الفنون الأخرى للحصول على الشكل الموجب من القوالب السالبة بخامات مختلفة من سبائك المعادن او الطينات الطبيعية أو اللدائن الصناعية .

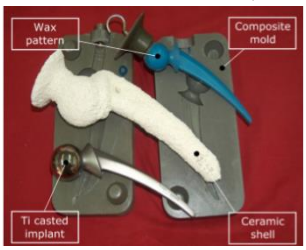
البرونز (Bronze) :

ينتج البرونز من خلط النحاس بالقصدير بنسبة نحو ٩٠٪ من النحاس و ١٠٪ من القصدير ، وقد شهد العالم القديم فترة تاريخية حملت أسمه سميت بفترة العصر البرونزي وهي الفترة ما بين عصر النحاس والعصر الحديدي ويختلف تاريخ ظهوره في أجزاء مختلفة من العالم وفقاً للمرحلة الحضارية لكل منطقة ، كما تشمل سبائك البرونز الأخرى برونز الألومنيوم، البرونز الفسفوري، برونز المنغنيز ومعادن الجرس والبرونز الزرنيخي وغيرها .[1]

لماذا قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell):

طريقة الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) هي طريقة شمع مفقود ويمكن أيضًا استخدام منتجات أخرى قابلة للاحتراق ، في هذه الطريقة يصنع نموذج شمعي يحاط بقشرة صلبة مقاومة للحرارة يحرق الشمع ويفقد النموذج ومن هنا جاء الاسم ، القشرة الصلبة المتبقية مناسبة لصب العديد من المعادن من الألومنيوم وحتى البرونز، وتعتبر طريقة القشرة أو الصدفة الخزفية تقنية مثبتة استخدمت في المسابك الصناعية كما في شكل رقم (١ ، ٢) منذ سنوات عديدة ، ويزداد استخدام قوالب الصدفة الخزفية أيضًا في مسابك الفنون .

شكل (١) ٢



شكل (٢)[٣]

تتكون هذه الطريقة من عجينة مصنوعة من سائل رابط ومسحوق ومادة صنفرة من خلال عملية متكررة من الغمس في العجينة والصنفرة ، يتم بناء القشرة من عدة طبقات على مدى بضع ساعات يتراوح عدد الطبقات في المتوسط بين ٦ و١٢ طبقة ، ويمكن خبز قوالب القشرة أو الصدفة الخزفية الناتجة في غضون ساعتين مما يوفر الكثير من الطاقة مقارنةً بطريقة الجبس التي كانت تستغرق هذه العملية عادةً ما بين٣ و٦ أيام ، أو الصب الرملي الذي يحتاج الو وقت طويل جداً في التشطيب .

بالإضافة إلى ذلك، فإن قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) أخف بكثير من قالب الجبس ، وهو أيضًا أكثر ملاءمة للكثيرين من الفنانين وكذلك لكونها طريقة بسيطة نسبيًا للاستخدام المتقطع .

1- https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%A8%D8%B1%D9%88%D9%86%D8%B2

٢- https://www.siliconesandmore.com/en/ceramic-shell-materials/

٣- Teresa P. Duarte1(*), Rui J. L. Neto1, Rui Félix2, Jorge Lino1, Bruno Rodrigues2, Tarsis Barbosa1, MANUFACTURING CERAMIC SHELLS FOR CASTING TITANIUM COMPONENTS, 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Funchal/Madeira, 23-27 June 2013 ,p 5 .

الخيار الأصلي والأكثر شيوعًا في المسابك الكبيرة عند صنع الملاط يتم عن طريق خلط مادة رابطة (معلق سيليكا وبوليمر قائم على الماء) ومسحوق الخزف أو (رمل ناعم) إذا لزم الأمر، يمكن إضافة مؤشر تجفيف، وعامل ترطيب، ومزيل رغوة .

تعتبر من مميزات مكونات قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) هي إمكانية حفظه دون خلط لسنوات عديدة أما عيبه فهو ضرورة خلطه باستمرار بعد الخلط فإذا بقي لفترة طويلة فإنه سيتجمد ويتكاثف ولا يمكن استخدامه ، لذلك، يجب امتلاك آلة خلط تعمل على مدار الساعة طوال أيام السنة ، وغالبًا ما تمثل هذه مشكلة للمستخدمين من الفنانين المبتدئين ولكن يمكنهم تحضير كمية أقل لاستخدامها مرة واحدة عن طريق سكب الخليط فوق النموذج عدة مرات والبعد عن طريقة الغمس التي تحتاج كمية كبيرة .

المتطلبات الرئيسية لقالب الصب الفني والاستثماري :

قوة خضراء كافية (غير محروقة) لتتحمل إزالة الشمع دون فشل ، قوة جدار كافية لتحمل وزن المعدن المصبوب والتعامل معه ، ضعيف بما يكفي لمنع التمزق الساخن في السبائك الحساسة ، مقاومة عالية للصدمات الحرارية لمنع التشقق أثناء صب المعدن ، استقرار كيميائي عالي ، تفاعل منخفض مع المعادن المصبوبة لضمان تشطيب سطح مناسب ، نفاذية كافية للقالب وموصلية حرارية كافية للحفاظ على انتقال حراري مناسب عبر القالب.[١]

يجب تواجد عمود شمعي، أو مجرى شمعي يثبت على النموذج بواسطة قطع صغيرة من مجاري الشمع تسمى عادةً بالبوابات ، تتيح هذه البوابات إنشاء مساحة يمكن أن يتدفق فيها المعدن المنصهر إلى تجويف النموذج المجوف يطلق على هذه التركيبة اسم "شجرة".

بعد ذلك تطلى شجرة الشمع بمزيج من مادة رابطة سائلة ومواد حرارية دقيقة بعد غمس الشجرة في مادة الملاط وتصريف المادة الزائدة منها وتغطى بالرمل أو الجص ويمكن إتمام هذه العملية بطرق متنوعة آلية أو بالتغطية اليدوية ، وبعد جفاف كل طبقة تكرر خطوات الغمس والجص حتى اكتمال القشرة ويختلف عدد الطبقات جزئيًا حسب تصميم القالب والمادة الرابطة المستخدمة في الملاط.

بعد اكتمال تسلسل الغمس وجفاف كل طبقة بالهواء بشكل كاف يزال الشمع من القالب إما باستخدام جهاز أوتوكلاف أو نظام إزالة الشمع بالحرارة والذي سيذيب الشمع من القشرة تاركا تجويف الشكل فارغاً، ثم توضع فالب الصدفة الخزفية في فرن حيث تحرق لفترة زمنية محددة مسبقًا يساعد هذا في تقوية القشرة وإزالة أي بقايا شمع متبقية من داخلها.

[١] - https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2013/data/papers/3998.pdf

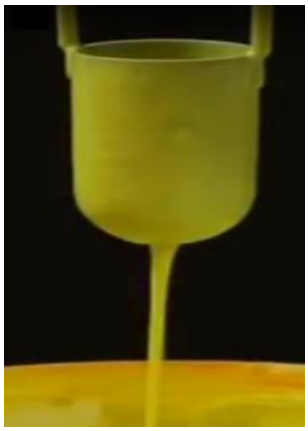
ثم يوضع قالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) المحروق في طبقة من الرمل مع توجيه فتحة كوب الصب لأعلى ثم يسكب المعدن المنصهر في القالب لتكتسب القشرة لون المعدن البرتقالي، ثم تتحول إلى اللون الأبيض مع تبريدها ، ثم تزال القشرة بعد ذلك وتقطع أجزاؤها من الشجرة وتتولى منطقة التشطيب مهمة إزالة أي أثر للمعدن من البوابة .[1]

عوامل نجاح انتاج قوالب من الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) :

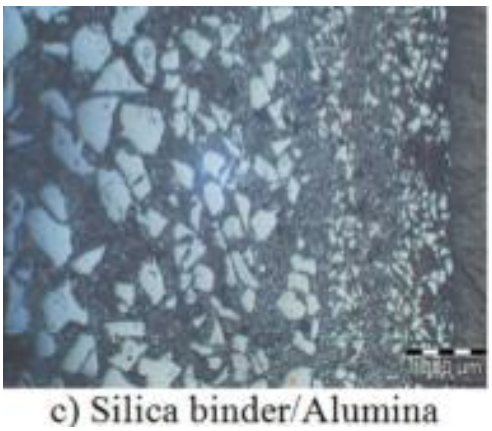
١-اللزوجة المناسبة . ٢-مدة البقاء . ٣-تقنية التصريف .
٤-متغيرات الإخراج (الملاحظات) . ٥-قوة الغلاف . ٦-سُمك الحافة .
٧-النفاذية الساخنة . ٨-سُمك الدائرة . ٩-حمل التقشر .

هناك ثلاثة متغيرات هامة يمكننا التحكم بها ومراعاتها جيداً وهما اللزوجة وزمن السكون وتقنية التصريف ، ويعتبر متغير اللزوجة مهم جداً في عملية صب قوالب الصدفة الخزفية من خلال قياس مقاومة السائل للتدفق وتحديد سمك أو رقة السائل ، كما تختلف أهداف اللزوجة لكل مسبك بحسب العملية وهندسة القطعة الفنية والخبرة الخاصة بطبيعتها .[٢]

تؤثر اللزوجة في نسبة سيولة المواد السائلة كما في الشكل رقم (٣) ، كما يعتبر متغير مدة البقاء (المدة التي تبقى فيها القشرة في الملاط قبل إزالتها للتصريف) ، حيث تمتص القشرة بعض السوائل عند غمرها ، هذا يعني أن مدة بقاء أطول تعني (امتصاص المزيد من السائل من الملاط) لأن ملاط التصريف أكثر اتساقاً في الريولوجيا (علم الجريان) ، كما أن مدة بقاء أقصر تعني (امتصاص المزيد من السائل من طبقة الملاط التي يتم تصريفها ، قد يتغير ملاط التصريف في "الريولوجيا" مع امتصاص السائل بواسطة القشرة) ، ويؤثر زمن البقاء بشكل أكبر على الطبقات التالية مقارنة بالطبقات الأولية.



شكل (٣) [٣]



شكل (٤) [٤]

١- https://www.ransom-randolph.com/ceramic-shell-process.

٢- https://www.investmentcasting.org/uploads/8/1/9/8/81988734/14_hendricks.pdf p 7 .

٣- https://www.investmentcasting.org/uploads/8/1/9/8/81988734/14_hendricks.pdf p 8 .

يعتبر الغرض من الصرف هو إزالة الملاط الزائد من القطعة، والتأكد من تغطية المجموعة بالتساوي لتقبل طبقة متجانسة من الجص ، والصرف هو مزيج من معالجة تركيبة المكونات والوقت ، وتشير التقديرات إلى أن أكثر من ٥٠٪ من الملاط الموجود على الشكل عند خروجه من خزان الملاط يجب أن يصرف مرة أخرى إلى الخزان ، يستغرق تصريف الملاط من القطعة المتحركة وقتا أطول من القطعة الراكدة ، يجب الوضع في الإعتبار وجود تصريف "راكد – تدفق" قبل البدء في عملية التصريف . [١]

مكونات خلطة قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) :

ووفقًا للسبائك المراد صبها يجب استخدام أنواع مختلفة من مسحوق الخزف والمواد الرابطة لإنتاج ملاط مناسب يسمح بخشونة منخفضة على سطح القشرة الداخلية، مع تفاعل منخفض مع المعدن المنصهر ونفاذية كافية تسمح بانتشار الهواء أثناء الصب، وقوة كافية لتحمل ضغط المعدن السائل دون أن ينكسر، وخصائص حرارية مناسبة لدعم الصدمة الحرارية أثناء الصب ، ويمكن استخدام المنتج بعد الصب مباشرةً أو إجراء بعض عمليات التشطيب البسيطة [٢] .

لذا من الواضح أن جميع المتغيرات العملية التي تتم أثناء تشكيل قوالب الصدفة الخزفية تؤثر على خصائص وأداء القشرة الخزفي عند صب معدن البرونز أو أي معدن آخر يتم صبه في هذه القوالب ، كما أن سمك جدار قوالب القشرة الخزفية يختلف بإختلاف نوع المعدن الذي سيتم صبه داخل القالب مثل البرونز أو النحاس أو الألومنيوم أو التيتانيوم أو الكروم .... الخ .

١- المواد الرابطة :

حلت أنظمة المواد الرابطة القائمة على الكحول محل أنظمة المواد الرابطة القائمة على الماء ، مواد رابطة وأنظمة مخصصة للتطبيقات الأساسية والاحتياطية مع وجود البوليمرات والألياف التي تعمل على زيادة معدل بناء جسم القالب وتقليل سمك القالب ، وتختلف مواد الرابط والمسحوق المستخدمة حسب نوع السبيكة المراد صبها، ومتطلبات وقت التجفيف، وعدد الطبقات المطلوبة .

تتميز المواد الرابطة الغروية غير المعدلة بقوة استثنائية مما ينتج جدار من الخامات الخزف يتمتع بقوة كافية لتحمل الظروف القاسية لصب المعادن المنصهرة دون حدوث أي فشل أو فقدان ملئ أجزاء في القالب ، عادةً ما يستخدم في إنتاج الأصداف الخزفية Ceramic)

_ Teresa P. Duarte1(*), Rui J. L. Neto1, Rui Félix2, Jorge Lino1, Bruno Rodrigues2, Tarsis Barbosa1, Ibid ,p 9.٤

- https://www.investmentcasting.org/uploads/8/1/9/8/81988734/14_hendricks.pdf p 9 .١

- https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2013/data/papers/3998.pdf٢

(Shell مواد رابطة "سيليكا غروية مائية" تحتوي هذه المواد الرابطة عادةً على ما بين ٢٠ و٣٠٪ وزن من جزيئات ثاني أكسيد السيليكون غير المتبلور، مثبتة بأيونات الصوديوم المضادة ، وظيفتها تجلط المادة الغروية لإنتاج طور رابط للجسيمات المقاومة للحرارة داخل قالب الصدفة الخزفية عن طريق إزالة الرطوبة . [١]

بفضل اضافة الشاموت الى المواد الغروية يتكون المولايت من تفاعل الألومينا والسيليكا كما في الشكل (٤) ، مما يعزز تكوين طور المولايت من قوة جدار القالب وتقليل الانكماش وكذلك قلة المسامية في قالب الصدفة الخزفية .

٢-البوليمرات :

من وظائفها تسريع تجفيف القالب مع زيادة الالتصاق للطبقات، زيادة القوة أثناء التشكيل والتجفيف ، تزيد البوليمرات من قوة خضرة السيراميك ، وتميل إلى تقليل مستوى الرطوبة في الطبقات المجففة سابقا عند إضافة طبقات جديدة ، تتبلور الشبكة غير المتبلورة خلال مرحلة التلبيد لتكوين رابطة خزفية قوية ، يساعد استخدام أيونات الصوديوم تبلور "الكريستوباليت" .

قد تنتج المواد الرابطة الغروية قوالب خزفية ذات قوة خضرة منخفضة قد تكون عرضة للتشقق أثناء إزالة الشمع والتعامل معه لذا يمكن التغلب على هذه المشكلة بإضافة بوليمرات سائلة سواءً كانت قائمة على اللاتكس للأنظمة القلوية أو قائمة على كحول البولي فينيل (PVA) للمواد الرابطة الحمضية.[٢]

٣-الألياف :

ألياف الصوف الزجاجي ، من وظائفها زيادة معدل البناء في جدار القالب ، تحسين الاحتفاظ بالطين على الحواف مع تقوية جسم القالب ، بجانب تقليل السمك وفق عدد الطبقات المطلوبة .

تعتبر قوة الغلاف من المتغيرات الهامة في قوالب الصدفة الخزفية بجانب سمك الجدار وسمك الحافة ، والسماح بنفاذية الحرارة والسمك الدائري لمحيط القالب يؤدي الى كفاءة الالب وقدرته على تحمل الحمل بجانب تمثيل أفضل لأجزاء القالب على الشكل الإجمال للقطعة المجسمة ثلاثية الأبعاد . [٣]

1 _ https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2013/data/papers/3998.pdf

٢- https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2013/data/papers/3998.pdf

٣. https://www.investmentcasting.org/uploads/8/1/9/8/81988734/14_hendricks.pdf p 10 -

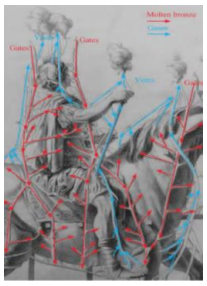
مزايا استخدام قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) في صب معدن البرونز:

١- الحصول على نسبة كبيرة جداً من نفس تفاصيل النموذج الأصلي .
٢- تمتاز قوالب الصدفة الخزفية بخفة وزن تصل ١٠ % مقارنة بالقوالب التقليدية .
٣- سرعة الحصول على القالب مما يوفر الوقت والجهد والخامات والمكان .
٤- تتحمل قوالب الصدفة الخزفية الصدمة الحرارية لمصور المعدن وهو في درجة حرارة عالية .
٥- صب المعادن المصهورة في القالب وهو ساخن يقلل من الإنسداد الناتج عن التبريد المفاجئ .
٦- لا تحتاج القطعة النحتية بعد الصب في قوالب الصدفة الخزفية الى مراحل تشطيب كثيرة ومرهقة .
٧- نسبة انكماش ضعيفة جداً تصل الى صفر تقريباً مما يتيح انتاج مستنسخات النحت الفنية .
٨- نظافة القطعة النحتية من (الرايش) الزوائد الناتجة عن فواصل أجزاء القالب .
٩- تقليل عدد الأجزاء في القالب الى جزء واحد فقط من القالب للمجسم النحتي .
١٠-تفريغ الشمع كاملاً بنسبة١٠٠٪ قبل الصب بالتسخين وإعادة استخدامه لاحقاً مما يوفر اقتصادياً.

مراحل تنفيذ قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) :

١- **تجهيز النموذج المراد صبه من خامة الشمع :** بمجرد أن يصبح القالب المطاطي جاهزًا للاستخدام يتم نقله إلى قسم الشمع، حيث تتم مهمة صنع النسخ المطلوبة يتم صب الشمع المنصهر في القالب لإنتاج نسخة مطابقة للأصل ، يتم إزالة الشمع من القالب وتفصيله كما في القطعة الأصلية عندما يكون الشمع جاهزًا ، يتم توصيله بأنظمة الصب وتحضيره للمرحلة التالية كما هو واضح في الشكل (٥ ، ٦) .
٢- **قنوات الصب :** تحتاج قوالب الشمع إلى نظام قنوات صب القناة هي قضيب شمعي طويل يبلغ قطره حوالي ثلاثة أرباع البوصة. تعمل القناة كقناة يتدفق من خلالها البرونز من الناحية المثالية، يجب أن يتدفق البرونز إلى أسفل التمثال ويرتفع إلى الأعلى. لأن البرونز يبرد بسرعة كبيرة، يجب أن يصل البرونز إلى كل جزء من التمثال في نفس الوقت كما هو واضح في الشكل (٧).

شكل (٥) [١]


شكل (٦) [٢]

شكل (٧) [٣]

٣- **خلط مكونات الصدفة الخزفية (Ceramic Shell)** : يجب مراعاة درجة اللزوجة المناسبة عند تغطية الشمع بطبقة أولية من الملاط الخزفي، الذي يحتوي على مسحوق مقاوم للحرارة دقيق جدًا وسيليكا غروية، يتبعها طبقة رقيقة من السيليكا المنصهرة ، ويمكن إضافة مسحوق الزركون حتى تجعل القشرة أكثر صلابة .

٤- **تكوين طبقة قالب الصدفة الخزفية** : تستخدم مكونات دقيقة للغاية لتحقيق سطح داخلي أملس في القالب ، يتم غمر قطع الشمع في الملاط ، في البداية يتم تغطيتها بسيليكا منصهرة نعومة الحبيبات (٤٠٠مش) ، (السيليكا المنصهرة هي زجاج محبب يمكنه تحمل درجات حرارة عالية للغاية)، تساعد السيليكا المنصهرة نعومة (٤٠٠ مش) في التقاط التفاصيل الدقيقة لقوالب الشمع ، توضع الطبقة الثانية بعد أن تجف الأولي، باستخدام سيليكا منصهرة ذات نعومة (٢٠٠ مش)، يساعد ذلك على تقوية وتثبيت الصدفة الخزفية، تتكرر هذه العملية عدة مرات حتى يتم تحقيق السماكة المطلوبة، ويتم بناء قالب الصدفة الخزفية عن طريق الغمس أو السكب المتكرر كما هو واضح في الشكل (٨).

شكل (٨)

٥- **التجفيف** : يتم ترك كل طبقة لتجف ثم توضع الطبقة التالية وهكذا في درجة حرارة تتراوح ما بين درجة ٢٣ – ٢٥°م ، بعدها يتم تقوية المناطق التي تحتاج إلى تعزيز إضافي باستخدام شرائح من الألياف الزجاجية المغموسة في الملاط بعد أن تبدو جميع

1 _ Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture Edited by David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, The free online edition of this open-access publication is available atgetty.edu/publications/bronze-guidelines/©First edition 2025,p274.

2_ Ibid., p.294.

3 _ Ibid., p.293.

حتى تصل جميع جوانب القالب قوية بدرجة كافية . يتم تعريض الملاط الى مصدر هواء دائم للتجفيف مثل (المروحة الكهربائية) .

٦- **مدة الغمس** : غمس النموذج في الخليط عدة مرات لمدة ١٠ ثوان في كل مرة كما في الشكل (٩ ، ١٠ ، ١١).

٧- **زيادة صلابة جسم القالب** : يتم نثر الرمل الناعم أو المسحوق الحراري (جروج) على الجسم ثم التعرض للهواء للتجفيف ، يعاد رش مسحوق الجص أو الرمل أو الشاموت الناعم عدة مرات .

٨- **سمك الجدار** : سمك جدار قالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) يتراوح ما بين٦ ملم حتى٨ ملم .

شكل (٩)[١]

شكل (١٠)[٢]

شكل (١١)[٣]

٩- **تفريغ الشمع** : بعد الجفاف يتم تسخين القالب من خلال جهاز "أوتوكلاف" ، وقد يستمر تفريغ الشمع بالحرارة حتى ٩٠٠°م تقريباً،

١٠-**حرق القالب** : من أجل الحصول على جدار قالب قوي وصلب يتم وضع القطعة في فرن آخر لمدة ساعتين حتى يصل الى أكثر من درجة حرارة ١١٠٠°م ، يقوم هذا الفرن بحرق البوليمرات وأي بقايا كربونية متبقية من عملية الحرق السابقة ، تتوقف درجة حرارة صلابة القالب حسب درجة انصهار مكونات نوع السبيكة المعدنية التي سيتم صبها في القالب .

لماذا سبيكة البرونز ؟

ما زال البرونز يتربع على عرش أكثر الخامات المستخدمة في النحت الفني منذ القدم وحتى الآن لما يحمله من قيمة جمالية وفنية عالية ، والمشتغلون به قليلون جداً نتيجة لصعوبة الحصول عليه سوى العديد من مراحل التنفيذ المعقدة والصعبة ، وكانت تستخدم في بعض الأغراض النفعية كما هو واضح في إبريق الماء (أكوامانيل) شكل (١٢)[٤] ومن الأعمال

1- Dave Berta, Casey Wolfe and Mike Hendricks Ransom & Randolph Maumee, HOW PROCESS VARIABLES IMPACT CERAMIC SHELL PROPERTIES AND PERFORMANCE, Ohio, USA, ,p15.

2 _- Dave Berta, Casey Wolfe and Mike Hendricks Ransom & Randolph Maumee, Ibid ,p16.

3 _- Dave Berta, Casey Wolfe and Mike Hendricks Ransom & Randolph Maumee, Ibid, ,p17.

4 _ David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture. The free online edition of this open-access publication is available atgetty.edu/publications/bronze-guidelines/©First edition 2025,p151.

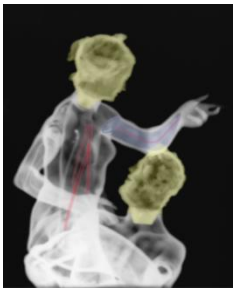
الجمالية لبعض الأعمال الإبداعية من قبل "نيكولا بيرون" التي تمثل السلام والوفرة والعدالة بمتحف اللوفر شكل (١٣) [١]

هذا بالإضافة الى أنه لم يبق سوى القليل من الفنانين من لديه المعرفة والمهارة الهائلة التي يحتاجها بجانب المعلومات التي دخلت في صناعة المنحوتات البرونزية على مر آلاف السنين والتي كانت لا تدون بشكل رسمي ، ولكن يستعين بعض الباحثين بما تدوينه لبعض المقتطفات حول تقنيات صب البرونز خلال القرن التاسع عشر مما تسببت في دفعة قوية نحو بحوث أرشيفية أكثر منهجية من جانب المؤرخين .[٢]

لقد تم تقديم عدة ترجمات لبعض الرسائل التقنية النادرة التي تقدم أوصافا لإنتاج البرونز في العصور الوسطى بأوروبا ، وقد كانت المعلومات الواردة في هذه النصوص حول تحضير المواد الخام، بالإضافة إلى خطوات عمليات الصب التي كانت قيمة للغاية في تفسير كل من السمات التقنية للمنحوتات البرونزية والبيانات التحليلية حول تركيبات السبائك والقوالب ، وقد شمل ذلك اكتشافات لمواقع مسابك في أنحاء مختلفة من العالم على سبيل المثال من القرن الخامس قبل الميلاد في "هوما" بالصين، وفي "أغورا" أثينا .

شكل (١٢)

شكل (١٣)


شكل (١٤)

شهد أوائل القرن العشرين زيادة في تطبيق العلم على دراسة ومعالجة الأعمال الفنية وتبادلًا دوليا للبيانات والأفكار من خلال المؤتمرات والمجلات المتخصصة ، وبعد الحرب العالمية الثانية استمر هذا التوجه بالإضافة إلى إنشاء مختبرات متاحف علمية جديدة ، حيث طبقت أدوات وأساليب علمية متطورة (مثل التأريخ بالتألق الحراري ومطيافية الامتصاص الذري وتحليل نظائر الرصاص، وتحليل فلورسنت الأشعة السينية) كما في شكل (١٤) لتحديد وتوصيف المواد وتتبع المصادر والتأريخ وانطلق علم القياس الأثري .

1 -- Ibid., p.167.

2 - Ibid.,p293.

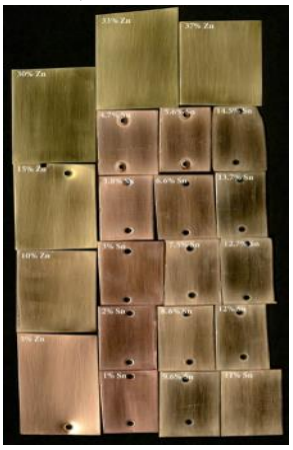
تسمية سبيكة البرونز :

أصبح مصطلح "البرونز" مصطلحا عاما لوصف المنحوتات التي قد تكون في الواقع مصنوعة من مجموعة كبيرة ومتنوعة من سبائك النحاس ، من النحاس غير المخلوط إلى النحاس الأصفر عالي الزنك، بالإضافة إلى السبائك الثلاثية والرباعية ، ويختلف استخدام وفهم تسمية السبائك بشكل كبير عبر المصادر التاريخية كما يستخدمها الحرفيون في الصناعة الحديثة .

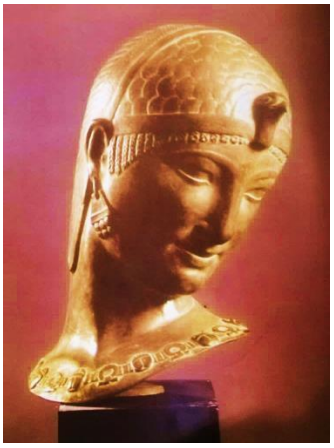
يستخدم مصطلح "البرونز" على نطاق واسع في مجال النحت الفني ، ولا يزال المصطلح المفضل للعديد من الأعمال الفنية أو المنحوتات المصبوبة من سبائك النحاس بغض النظر عن تركيبها الفعلي .

لماذا نصنع سبيكة ؟

تنتج سبائك النحاس بدمج المعادن المختلفة في بوتقة أو فرن ، تتيح إضافة عناصر معدنية مختلفة إلى النحاس التحكم في خصائص السبيكة الناتجة (مثل قابلية الصب، والمتانة، ومقاومة التآكل، وقابلية التشكيل) حسب رغبة النحات ، وقد تلعب التأثيرات الثقافية وتكلفة المواد الخام وحاجة السبيكة إلى التذهيب واللون المطلوب دورا في اختيار السبيكة كما هو واضح في الشكل (١٥ ، ١٦) ومن التأثيرات الجمالية والتعبيرية لفن النحت بخامة البرونز ما نشاهده في أعمال الفنان سامي محمد شكل (١٧) .



شكل (١٥)[١]



شكل (١٦)[٢]

شكل (١٧)[٣]

خامات تركيب البرونز :

1 _ David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture. The free online edition of this open-access publication is available atgetty.edu/publications/bronze-guidelines/©First edition 2025,p328.

[٢] – بدر الدين أبو غازي ٢٠٠٤م : المثال مختار ، سلسلة أفاق الفن التشكيلي ، الهيئة المصرية العامة للكتاب ، ص ٥٣٢.

[٣] – سامي محمد ١٩٩٥م : مسيرة حياة الفنان سامي محمد أحمد الصالح ، الناشر المؤلف ، الطبعة الأولى ، ص ٢٨٧.

البرونز ليس معدن ولكنه سبيكة تتكون من خلط عدة معادن أهمها سبائك النحاس المستخدمة في صنع المنحوتات المصبوبة والقطع النحتية، وأهم معيارين يمكن من خلالهما توصيف المعادن هو تركيبها الكيميائي من العناصر وبنيتها المجهرية، ويتحكم هذان المعياران في الخصائص الكيميائية للسبائك مثل مقاومتها للتآكل والخصائص الفيزيائية مثل لونها ومتانتها.[1]

ويعني مصطلح "برونز" معانٍ متعددة فقد يشير إلى سبيكة نحاسية يضاف إليها القصدير كعنصر أساسي أو أي سبيكة أخرى أساسها النحاس ، ويستخدم مصطلح "برونز" في اللغة الشائعة لوصف معظم منحوتات سبائك النحاس بغض النظر عن تركيب العناصر الفعلية للسبيكة ، وتتضمن منحوتات البرونز سواء جوهريا أو تصميميا عددا من العناصر الأخرى .

كما يشير تنوع السبائك المستخدمة في النحت البرونزي عبر التاريخ إلى عدم وجود سبيكة مثالية ، وهناك أسباب متعددة لذلك بدءا من التنافس المحتمل بين الخصائص بما في ذلك الصلابة وقابلية الصب تبعا لمتطلبات العمل النهائي ، ويعد هدف التمثال وطريقة عمله (كمية النقش وطبيعة الباتينا والتذهيب وما إلى ذلك) أمرا أساسياً .

من المفيد معرفة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمعدن في المنحوتة وقد تسهم معرفة خاصية معينة في مناقشة قصدية وجود عنصر معين أو كميته، والهدف الذي يستهدفه الفنان، قد يكون من الممكن مناقشة وجود كميات كبيرة من الرصاص في منحوتة معينة إذا كان ذلك مقصودًا، فهل كان ذلك لتحسين قابلية الصب، أم لخفض تكلفة المعدن، أم بسبب التقاليد أو المعتقدات وقد يفتح هذا آفاقا واسعة للبحث (نقل المعرفة والخبرات ونسب المواد وما إلى ذلك)، يعتبر الرصاص بنسبة ٢.٥٪ سبيكة عالية جدا من الرصاص ، بينما في المنحوتات اليونانية والرومانية القديمة توصف هذه السبائك بأنها خالية من الرصاص وتحتوي البرونزيات عالية الرصاص على ما يصل إلى ٣٠٪ من الرصاص في التماثيل الرومانية ، وبالمثل تسمى سبيكة الزنك بنسبة ١٠٪ برونزا تجاريا .[٢]

مميزات سبيكة البرونز :

تعد قابلية تجميع سبائك النحاس وخاصة باللحام عاملا بالغ الأهمية حيث يختار المصنعون المعادن المستخدمة في الصب واللحام ، ولا بد أن هذا ينطبق على صائغي المعادن

1 - - David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, Ibid,p32.

2 _ Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture Edited by David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, The free online edition of this open-access publication is available atgetty.edu/publications/bronze-guidelines/©First edition 2025,p38.

الذين يستخدمون لحام الانصهار التدفقي في العصور القديمة كما ينطبق على اللحامين في المسابك الحديثة .

يتميز بالخصائص الرمزية الموجودة في بعض الثقافات التي تعتقد في بعض سبائك النحاس أنها لا تزال مشبعة بقوى روحية محددة قد تعزى هذه القوى إلى المعدن نفسه ، بجانب بعض الخصائص الجوهرية المختلفة مثل اللون أو الرائحة ، بجانب قابليتها لإضافة معادن نادرة ومواد أخرى إلى المصهور .

يوفر البرونز الذي يحتوي على حوالي ١٠٪ من القصدير توازنا جيدا بين قابلية الصب ومقاومة التآكل والقوة الميكانيكية والصلابة ، وأصبح هذا السبيكة معيارا في وقتٍ مبكرٍ من العصر البرونزي المتأخر للأدوات والأسلحة وللبرونزيات الكبيرة خلال العصور القديمة ، ومع ذلك فإن سبائك النحاس التي تحتوي على الزنك منتشرةٌ أيضا لا سيما في العصر الحديث.[١]

تعد تسمية سبائك النحاس قضية قديمة بين العلماء في الصناعة الحديثة ، يشير مصطلح "النحاس الأحمر" إلى سبيكتين مختلفتين تماما حسب استخدامه بالنسبة للسبائك المطروقة ، وتسمى أحيانا "تومباك" بالنسبة للسبائك المصبوبة فهي سبيكة رباعية ، ولا تزال التركيبات التي تحتوي على ما يصل إلى ٢-٣٪ وزنا من الزنك والقصدير والرصاص تعتبر نحاسا غير مخلوط .

خطوات ومتطلبات صب البرونز :

١- **تسخين القالب قبل صب المعدن :** يوضع قالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) وهو ساخن في حوض وحولة رمل من جميع الجهات حتى فتحة الصب ، بمجرد اكتمال حرق الشمع يتم إبقاء قوالب الصدفة الخزفية ساخنة بينما يتم صهر البرونز .

٢- **يتم صب مصهور البرونز في القالب :** في هذه المرحلة، يتم صهر قوالب البرونز في بوتقة عند درجة حرارة تقترب من ٢١٠٠ درجة فهرنهايت أي ما يعادل (١١٥٠ درجة مئوية) حتى يذوب البرونز، وبمجرد إزالة الشوائب من أعلى البوتقة يتم إخراج القوالب ووضعها في صندوق رمل ، يتم إيقاف تشغيل الفرن وباستخدام معدات الحماية يتم صب البرونز في قوالب الصدفة الخزفية المجوفة ، ثم يتم ملئ الأصداف الخزفية التي تم تسخينها وتحضيرها مسبقًا بهذا البرونز المنصهر، مما يحول الشكل السالب إلى الشكل الموجب، وهو القطعة الفنية نفسها، ، تترك هذه الأصداف لتبرد طوال الليل، ثم

1 _ Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture Edited by David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, The free online edition of this open-access publication is available atgetty.edu/publications/bronze-guidelines/©First edition 2025.p26.

يتم تنظيفها ورشها بالرمل في صباح اليوم التالي، مما يكشف عن صب برونزي جديد جاهز لبدء عملية التشطيب المعدني.

٣- **تقشير القالب :** بعد ملاحظة برودة القالب بعد الصب يتم نزع قشرة الصدفة الخزفية وتكسيرها من فوق المجسم .

٤- **التشطيب والتلميع والتبتين للمجسم :** يقوم فنيي التلميع المعدني ذوي المهارات العالية بواسطة تقنيات تقليدية مع تكنولوجيا حديثة لتحقيق تشطيب سلس .

٥- **التشطيب بالباتينا :** الباتينا هي المرحلة الأخيرة من العملية، حيث يتم إضافة اللون إلى القطعة الفنية من خلال الجمع بين الحرارة والتطبيق الكيميائي، مما يغير عملية الأكسدة على أسطح المعدن. إنها تفاعل النترات والأكاسيد والكبريتات على سطح البرونز؛ مما يخلق لونًا بنيًا تقليديًا للمتاحف أو لوحة ألوان معاصرة بأنماط مختلفة. لدينا جدار من العينات في الموقع.

عيوب صب البرونز :

قد تعتبر الاختلافات في تركيب السبيكة عيوبا في الصب إذ قد تؤثر بشدة على لون السبيكة ومقاومتها للعوامل الميكانيكية والتآكلية طوال عمر القطعة، وتشمل الثقوب والتجاويف والشقوق والزوائد والانخفاضات على الأسطح الداخلية أو الخارجية، وتشوهات الشكل أهم العيوب التي قد تظهر في صب البرونز، وعادة ما يندفع القصدير والرصاص من الطبقة الداخلية تحت السطح إلى سطحه الخارجي تعرف ظاهرة الفصل هذه باسم عرق القصدير أو الرصاص، وتعطي السطح مظهرا رماديا فضيا قد يكون عرق القصدير وكذلك عرق الزرنيخ مقصودا .

وفي ذلك يقول أحد الفنانين "أثناء صنع البرونز الخاص بي، غالبا ما أسمح بوجود عيوب معينة في الصب، أو حتى أشجعها، يمكن للأسطح الحبيبية أو المثقوبة في مناطق صغيرة منفصلة أن تعمل بشكل جيد خاصةً مع الباتينا متعددة الألوان للغاية ، كما أن الخطوط الدقيقة المتلألئة التي تتشكل نتيجة تشقق القالب تحت ضغط البرونز يمكن أن تنشئ هياكل تذكرنا بالجروح أو الندوب الجسدية وهذا يساعدني على الإشارة إلى هشاشة أو رقة في الشكل يصعب إنشاؤها بالنمذجة وحدها."[١]

1 _ Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture Edited by David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, The free online edition of this open-access publication is available atgetty.edu/publications/bronze-guidelines/©First edition 2025.p44.

نتائج البحث :

١- قوالب الصدفة الخزفية في صب البرونز أفضل من القوالب التقليدية.

٢- تعتبر طريقة صب البرونز في الأصداف الخزفية ممكنة رغم أنها عملية معقدة .

٣- قالب الصدفة الخزفية يحرق وفي الوقت نفسه يصبح قالب حراري يستخدم في صب البرونز/ القطع الفنية ، وتتكون القشرة عادة من ٥ إلى ١٢ طبقة حسب نوع المعدن وحجم الصب .

٤- قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) تستخدم فيها مكونات دقيقة للغاية لتحقيق سطح داخلي أملس في الغلاف الخزفي .

٥- تتمتع قوالب الصدفة الخزفية (Ceramic Shell) بمقاومة كافية للحرق والتجفيف، وتمدد حراري منخفض لمنع تغيرات الأبعاد، وثبات كيميائي عال، ومقاومة عالية للصدمات الحرارية .

٦- يتكون "الموليت" من تفاعل الألومينا والسيليكا مما يعزز تكوين طور "الموليت" من قوة جدار القالب وتقليل الانكماش وكذلك قلة المسامية في قالب الصدفة الخزفية .

٧- تحمي الألومينا (الموليت) قالب الصدفة الخزفية من التآكل والتفاعل الكيميائي بين القشرة والمعدن المنصهر أثناء الصب .

٨- تتميز قوالب الصدفة الخزفية بنعومة التشطيب الداخلي لها والتشطيب السطحي للمنتج المصبوب .

٩- تعتبر طريقة الشمع المفقود هي الطريقة الأكثر استخداماً لصب البرونز .

١٠-تمتاز قوالب الصدفة الخزفية بالدقة العالية في التقاط كمية كبيرة جداً من التفاصيل .

١١-طريقة الصب في قوالب الصدفة الخزفية تستغرق وقت أقصر في التنفيذ من القوالب الأخرى .

١٢-تستخدم قوالب الصدفة الخزفية بشكل رئيسي في الإعدادات الصناعية لإنتاج قطع الآلات الصغيرة.

١٣-توفر طريقة الصدفة الخزفية للفنانين "دقة لا تصدق وتفاصيل سطحية" وتتطلب وقتاً أقل .

١٤-يجب خلط الملاط باستمرار أو تعليقه بالكامل حتى لا يتصلب .

التوصيات : يوصي البحث الحالي بالآتي :

١- ضرورة نشر وتبادل الخبرات بين الفنانين فيما يتعلق بتكنولوجيا الخامات المتعلقة بالقوالب لمساعدة الفنانين الشباب في انجاز أعمالهم بمستويات عالية من الجودة والإتقان .

٢- تكثيف الدراسات حول تطوير أنظمة استنساخ قطع النحت الفنية بطرق سهلة وميسرة .

٣- توجيه الدراسات حول ابتكار خامات حديثة لصب قطع النحت الفنية تناسب الظروف الجوية المختلفة .

المراجع

١- بدر الدين أبو غازي ٢٠٠٤ : المثال مختار ، الهيئة المصرية العامة للكتاب .

٢- ثروت عكاشة ٢٠١٣م : الفن الإغريقي، الهيئة المصرية العامة للكتاب، الطبعة الثانية .

٣- ثروت عكاشة ١٩٩٠ : الفن الفارسي القديم ، دار المستقبل العربي ، الطبعة الأولى .

٤- سامي محمد ١٩٩٥م : مسيرة حياة الفنان سامي محمد أحمد الصالح ، الناشر المؤلف، الطبعة الأولى.

5- Guidelines for the Technical Examination of Bronze Sculpture.Edited by David Bourgarit, Jane Bassett, Francesca G. Bewer, Arlen Heginbotham, Andrew Lacey, The free online edition of this open-access publication is available atgetty.edu/publications/bronze-guidelines/©First edition 2025.

6- https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2013/data/papers/3998.pdf

7- https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%A8%D8%B1%D9%88%D9%86%D8%B2

8- https://www.siliconesandmore.com/en/ceramic-shell-materials/

9- https://www.ransom-randolph.com/ceramic-shell-process.

10- https://www.investmentcasting.org/uploads/8/1/9/8/81988734/14_hendricks.pdf

11- https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2013/data/papers/3998.pdf.

12- Teresa P. Duarte1(*), Rui J. L. Neto1, Rui Félix2, Jorge Lino1, Bruno Rodrigues2, Tarsis Barbosa1, MANUFACTURING CERAMIC SHELLS FOR CASTING TITANIUM COMPONENTS, 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Funchal/Madeira, 23-27 June 2013 .

13- Dave Berta, Casey Wolfe and Mike Hendricks Ransom & Randolph Maumee, HOW PROCESS VARIABLES IMPACT CERAMIC SHELL PROPERTIES AND PERFORMANCE,Ohio, USA,

14- https://www.investmentcasting.org/uploads/8/1/9/8/81988734/14_hendricks.pdf