خواص الزجاج المُشكل بالمشعل الحراري وفاعلية الحرارة المؤثرة على الزجاج أثناء مراحل التشكيل

"Properties of Flameworking glass and the effectiveness of heat affecting the glass during the formation stages"

أ.د/ عز الدين عبد العزيز حسن

أستاذ التصميم ورئيس قسم الزجاج الأسبق- كلية الفنون التطبيقية-جامعة حلوان

Prof. Ezz El-Deen Abd El-Aziz Hasan

Prof. of Design and former Head of the Glass Department, Faculty of Applied Arts, Helwan University

Ezzeldin_abdrbo@a-arts.helwan.edu.eg

أ.د/ حسام الدين نظمي حسني

أستاذ أساليب وطرق إنتاج الزجاج- كلية الفنون التطبيقية- جامعة حلوان

Prof. Hossam El-Deen Nazmy Hosny

Prof. of Glass Production Methods and ways, Faculty of Applied Arts, Helwan University

Hossamnazmy6@yahoo.com

م.م/ أمل خالد حسين أبوسيف

مدرس مساعد بقسم الزجاج-كلية الفنون التطبيقية-جامعة حلوان

Assist. Lect. Amal Khaled Abouseif

Assistant Lecturer in glass Department, Faculty of Applied Arts, Helwan University

Amal.khaled.abouseif@gmail.com

الملخص:

تستخدم الأعمدة والأنابيب الزجاجية في عمليات تنفيذ المنتجات الزجاجية بتقنيات إعادة التشكيل بالمشعل الحراري، ويعد زجاج البوروسليكات وزجاج الصودا جير أكثر أنواع الزجاج المُستخدم في التشكيل بالمشعل الحراري شيوعاً، وغالباً ما يُستخدم زجاج البوروسيليكات في عمليات التشكيل بالنفخ، ويُستخدم زجاج الصودا جير في عمليات التشكيل المصمت، ويُكوّن هذان النوعان مجموعة من العناصر الكيميائية التي تؤثر طريقة تفاعلها بين بعضها البعض على مجموعة من الخواص الطبيعية والكيميائية التي يتفرد بها كل نوع من هذه الأنواع.

ويعتبر التركيب الكيميائي والخواص الفيزيائية للزجاج وعلاقتها بالحرارة الناتجة من المشعل الحراري أحد العوامل الهامة المؤثرة في آليات التشكيل، وبالتالي تؤثر في تحقيق المتطلبات الجمالية والاستخدامية للمنتجات الزجاجية المشكلة منها، وكذلك على الشكل النهائي للمنتج، ومن هنا تأتي أهمية دراسة هذه الخواص، وكذا دراسة لهب المشعل الحراري وأثر الحرارة الناتجة عنه على الزجاج أثناء التشكيل.

ومن هذا تكمن **مشكلة البحث** في انخفاض منظومة إنتاج الزجاج بتقنيات إعادة التشكيل بالمشعل الحراري نتيجة لعدم توافر المعلومات الكافية حول خواص الزجاج والعوامل المؤثرة على زجاج المشاعل أثناء التشكيل بالحرارة.

أما **هدف البحث** فهو تحديد العوامل المؤثرة على زجاج المشاعل، وإظهار أثر الحرارة على المنتج الزجاجي أثناء مراحل تشكيله.

ويفترض البحث أن تحديد العوامل المرتبطة بالتشكيل بالحرارة لزجاج المشاعل يزيد من القدرة على توظيفها لتحقيق متطلبات التشكيل الجيد لهذه المنتجات.

وقد تناول البحث عدة محاور منها: (أنواع الزجاج المستخدم في التشكيل بالمشعل الحراري، المواد الأولية المكونة للزجاج وتفسير حركة التفاعلات فيما بينها، العوامل المؤثرة على زجاج المشاعل أثناء التشكيل بالحرارة، كيمياء لهب المشعل الحراري وأثرها على الزجاج المستخدم في التشكيل، نظم التبريد، الخواص الحرارية لبعض أنواع زجاج المشاعل ومواصفات استخدامها عند التشكيل)، وقد توصل البحث إلى بعض النتائج منها: (تحديد أهم العوامل المؤثرة على زجاج المشاعل أثناء التشكيل بالحرارة، إظهار أثر كيمياء لهب المشعل الحراري على خصائص الزجاج الشفاف والملون عند مراحل تشكيله، تحديد الخواص الحرارية لبعض أنواع زجاج المشاعل الأكثر انتشاراً ومواصفات استخدامها عند التشكيل بالحرارة).

الكلمات المفتاحية:
أنواع زجاج المشعل الحراري- الخواص الحرارية للزجاج- أنواع لهب المشعل الحراري.

The Abstract:

Glass Rods and Tubes are used to form Glass products using Lampworking Techniques. Borosilicate glass and Soda-lime glass are the most common used glass in forming with lampworking, usually Borosilicate glass is used in Blow forming, while Soda-lime Glass is used in forming with sold rods. Both those types of glass are forming from a group of chemical elements, which their chemical interaction between each other affect groups of natural and chemical elements that each type of those glass are unique with it.

The chemical composition and physical properties of glass and their relationship to the heat resulting from the flame torch are an important factor influencing the mechanisms of formation, thus affecting the achievement of the aesthetic and use requirements of the glass products formed from them, as well as on the final form of the product Therefore, it is important to study these glass types' properties and the flame of the torch and the heat produced from it during the heat forming process.

And here comes the problem of research in the reduction of the glass production system with lampworking restructuring techniques due to the lack of sufficient information on the properties of glass and factors affecting lampworking glass during heat formation. The aim of the research is to identify the factors affecting the lampworking glass and to show the effect of heat on the glass product during the formation stages. The research assumes that identifying the factors associated with the heat formation of lampworking glass increases the ability to employ them to meet the requirements for the good composition of these products. And this research has discussed several axes including: (Types of flameworking glass, raw materials compromising glass and explain the chemical interaction between each other, Factors impacting flameworking glass during heat forming, The chemistry of the flame and its effect on the glass used in formation, Annealing systems, Thermal properties of some of flameworking glass and their using specs during forming), And the paper has reached some results, including: (Identifying the most important factors affecting the flameworking glass during heat formation process, Show the effect of the chemistry of the flame on the properties of transparent and coloured glass during their forming stages, specify the Thermal properties of some types of flameworking glass that is most commonly used and their using specs while heat forming).

Key words:
Types of Flame working Glass-Thermal properties of Glass-Types of torch Flames for Lampworking/Flameworking

- مقدمة :

إن من أكثر أنواع الزجاج المُستخدم في التشكيل بالمشعل الحراري شيوعاً زجاج البوروسيليكات، وزجاج الصودا جير، وغالباً ما يُستخدم زجاج البوروسيليكات في عمليات التشكيل بالنفخ، ويُستخدم زجاج الصودا جير في عمليات التشكيل المصمت(م.١،ص.٥١). ويُكوّن هذان النوعان مجموعة من العناصر الكيميائية التي تؤثر طريقة تفاعلها بين بعضها البعض على مجموعة من الخواص الطبيعية والكيميائية التي يتفرد بها كل نوع من هذه الأنواع.

وبجانب تأثير تفاعلات العناصر الكيميائية المتواجدة داخل المواد الأولية على زجاج الأنابيب والأعمدة أثناء إنتاجه، والذي يظهر جلياً في الأعمدة والأنابيب الملونة كأحد أكثر العوامل التي يظهر بها أثر التفاعلات الحادثة بين العناصر الكيميائية؛ فإن الحرارة الناتجة من لهب المشعل الحراري لها أثر كبير على عمليات التشكيل بالأنابيب والأعمدة الزجاجية، وكذلك على الشكل النهائي للمنتج، ومن هنا تأتي أهمية دراسة المواد الأولية لزجاج المشاعل، وكذا دراسة لهب المشعل الحراري وأثر الحرارة الناتجة عنه على الزجاج أثناء التشكيل.

- أنواع الزجاج المستخدم في التشكيل بالمشعل الحراري:

تتعدد أنواع الزجاج المستخدم في التقنيات المختلفة لتشكيل الزجاج، ولكن يقتصر الزجاج المستخدم في عمليات التشكيل بالمشعل الحراري على نوعين أساسين هما:

أ- زجاج البوروسيليكات (Borosilicate Glass): ويقع المدى الحراري لتشغيله Working Range[٢] عند درجات حرارة مرتفعة فيما بين ١١٠٠°م إلى تقريباً ١٦٠٠°م ، ويطلق على زجاج البوروسيليكات مسمى **"الزجاج الصلب Hard Glass"**؛ بسبب مقاومته العالية للتغيرات الحرارية المفاجئة لاحتوائه على نسب عالية من السيليكا مع أكسيد البورون، ويضم زجاج البوروسيليكات نسبة أعلى من أكسيد السيليكون مقارنة مع زجاج الرصاص وزجاج الصودا جير، وكذلك نسبة أقل من القلوي مقارنة بزجاج الجير الصودي(م.٢،ص.٥٣). وفي الغالب يكون تركيبه الكيميائي كالتالي(م.٢، ص.٢٦):

سيليكا	SiO_2	٨٠-٦٠ %
أكسيد البورون	B_2O_3	٢٥-١٠ %
أكسيد ألومنيوم	Al_2O_3	٤-١ %

وغالباً ما يكون زجاج البوروسليكات المستخدم في التشكيل على المشعل الحراري على هيئة أنابيب زجاجية ذات أقطار متعددة، وتكون الأنابيب من زجاج شفاف أو ملون، كما يمكن أن يتواجد على هيئة أعمدة زجاجية شفافة أو ملونة.

ب- الزجاج اللين Soft Glass : هو الزجاج الذي يكون معدل التشغيل الخاص به عند درجات حرارة منخفضة نسبياً، ويندرج تحته نوعين أساسين : زجاج الصودا جير- زجاج الرصاص. والنوع الأكثر شهرة في الاستخدام بينهما هو زجاج الصودا جير.

وزجاج الصودا جير(Soda-Lime Glass) هو أكثر أنواع الزجاج شيوعاً وأقلها تكلفة؛ لانخفاض ثمن المواد الخام التي تدخل في تركيبه وللكميات الكبيرة المنتجة منه. وفي الغالب يحتوي على نسب التركيبات التالية (م.١٠):

سيليكا	SiO_2	٧٥-٦٠ %

أكسيد صوديوم Na_2O ١٢-١٨ %

أكسيد كالسيوم CaO ٥-١٢ %

بالإضافة إلى نسبة قليلة من أكسيد الألومنيوم Al_2O_3 وأكسيد الماغنسيم MgO وغيرها.

وغالباً ما يكون زجاج الصودا جير المستخدم في التشكيل على المشعل الحراري على هيئة أعمدة زجاجية ذات سماكات متعددة، ويتم استخدام الأعمدة الملونة أو الشفافة في التشكيل، وقد يتم استخدام الأعمدة الشفافة في تغطية أو تغليف الزجاج الملون الذي تم تشكيله؛ لحمايته من التغير اللوني أو التشوه بفعل حرارة اللهب. كما يتواجد منه أيضاً أنابيب زجاجية، ولكن تستخدم فى تشكيل منتجات صغيرة، وإستخدامها لا يتطلب المتانة العالية، فهي ليست فقط حساسة بعد تشكيلها، وكن أيضاً أثناء التشكيل.

- المواد الأولية المكونة للزجاج وتفسير حركة التفاعلات فيما بينها:

تعتبر المواد الأولية (المواد الخام) هي المصدر الأساسي للأكاسيد الداخلة في الخلطة الزجاجية، حيث تتواجد الأكاسيد في تلك الصورة في الطبيعة وبمجرد وجودها في الخلطة وتفاعلها مع مكوناتها تحت تأثير الحرارة تنتج الأكاسيد المكونة للزجاج. وتعتبر السيليكا هي المكون الرئيسي للزجاج حيث تصل نسبتها في بعض أنواع الزجاج إلى ٩٦% فيما يعرف بزجاج السيليكا(م.٧،ص.٢٥). وبسبب درجة الانصهار العالية للسيليكا يتم إضافة عناصر لخفض درجة حرارة الانصهار إلى معدلات معتدلة فيما يعرف بمواد الصهر Fluxes مثل أكسيد الصوديوم وأكسيد البوتاسيوم. ويحتاج الزجاج أيضاً إلى عناصر تُعرف بالمثبتات Stabilizers مثل أكسيد الكالسيوم لجعله أكثر قوة ومقاومة. بالإضافة لعدد من الأكاسيد الأخرى التي يتم إضافتها للخلطة الزجاجية لتوفر خواص معينة مثل الأكاسيد الملونة كالكوبلت والحديد وغيرها من الأكاسيد. وهناك عدد من العناصر الأخرى التي يتم إضافتها بكميات متنوعة لتحسين خواص معينة مثل تحسين الخواص البصرية ورفع المقاومة الكيميائية حسب نوع الزجاج المراد تصنيعه. وبالنسبة للأعمدة أو الأنابيب الزجاجية فالزجاج اللين (سليكا – صودا جير) يعتمد على نسب شبه ثابته بين أكسيد الألومنيوم وأكسيد الصوديوم وأكسيد الكالسيوم، أما الزجاج الصلب (البوروسليكات) فيعتمد على نسب أكسيد سيليكون أعلى قليلاً من الزجاج اللين(م.١،ص.٥٣). والجدول التالي يعرض أهم المواد الأولية المكونة للزجاج وعناصر الأكاسيد الناتجة منها للزجاج المستخدم في التشكيل باللهب:

جدول رقم (١): المواد الأولية المكونة للزجاج وأثرها فى تكوين زجاج المشاعل

م	العنصر	أهم خواصه وأثره في تكوين زجاج المشاعل
١	السليكا SiO_2	تتوافر السيليكا بسهولة كمادة موجودة في الطبيعة (الرمال). وهي أكثر العناصر أهمية في جميع أنواع الزجاج المُستخدم في صناعة الأعمدة والأنابيب الزجاجية لكونها الأكسيد الرئيسي كمكون للشبكة (principal glass-forming oxide) في كثير من خلطات الزجاج، حيث تتراوح نسبة السيليكا SiO_2 ما بين ٦٠-٨٠ % في زجاج البوروسيليكات، وما بين ٦٠-٧٢% في زجاج الصودا جير(م.١). وتزيد المعدلات العالية من عنصر السيليكا في خلطة الزجاج من الحرارة المطلوبة لانصهار الزجاج، كما أنها ترفع درجة حرارة التشغيل وتقلل من معامل التمدد الحراري(م.٢)؛ مما يجعلها مناسبة أكثر لأنواع الزجاج الذي يُستخدم في طرق التشكيل التي تقوم على إضافة الكثير من التفاصيل خارج لهب المشعل الحراري. وكذلك في الأنابيب حيث أن رقة سمك جدران الأنابيب بسبب كونها مفرغة من الداخل يجعل من الأفضل ألا تتعرض لحرارة لهب المشعل لفترة طويلة.

٢	الصودا آش Soda ash	هي مصدر كربونات الصوديوم Na_2Co_3 والذي يُعتبر أحد المكونات الأساسية في الزجاج اللين المُعرف بزجاج الصودا جير، ومن خلال انصهارها داخل الخلطة الزجاجية ينتج أكسيد الصوديوم Na_2O ويصبح جزءاً من الزجاج، ويتحرر ثاني أكسيد الكربون Co_2 (م.٦،ص.٢٧). ويُعتبر أكسيد الصوديوم المُكَوِن الثاني في الأهمية بالنسبة لزجاج الصودا جير حيث تتراوح نسبته ما بين ١٢-١٨ % ، وهو يعمل كعامل صهر (Flux) لخفض درجة حرارة التشغيل Working temperature حيث أن إضافة أكسيد الصوديوم إلى السيليكا يقلل من درجات الحرارة التي يحتاجها الزجاج لكي ينصهر، كما أن له دور هام في استقرار (setting) التمدد الحراري للأعمدة الزجاجية(م.٢). وهذا يجعل زجاج الصودا جير مناسب لمشاعل الخلط السطحي Surface mix tourch حيث لا يحتاج إلى درجة حرارة تشغيل عالية، بينما يُفضل استخدام مشاعل الخلط الداخلي Internal-mix tourch أو المشاعل التي تعتمد على ثلاث عناصر للتشغيل (الأوكسجين والغاز والهواء) – وهذا هو النوع الشائع الاستخدام في مصر- أثناء التشكيل باستخدام زجاج البوروسيليكات(م.١،ص.٨١).
٣	الجير أو الكلس Lime	يتم الحصول على أكسيد الكالسيوم بسهولة من كربونات الكالسيوم ($CaCo_3$) والتي تتواجد طبيعاً في حجر الكلس(م.٧،ص.٢٣) Limestone. وأكسيد الكالسيوم هو الأكسيد التالي في الأهمية لأكسيد الصوديوم في زجاج الصودا جير وتتراوح نسبته في الخلطة ما بين ٥-١٢ %. وأكسيد الكالسيوم شائع الاستخدام كمكوِّن معدِّل للشبكة property modifier component في خلطة الزجاج، كما أن له تأثير على جعل المقاومة الكيميائية للزجاج أكثر استقراراً.
٤	مركبات البورون Boron Compounds	هي ثلاثي أكسيد البورون وحمض البوريك H_3Bo_3، وهي مصدر أكسيد البورون B_2O_3 في الخلطة الزجاجية، وغالباً ما يتم تحويل هذه المركبات كيميائياً إلى أكسيد بورون خالص، ويُعتبر أحد العناصر الهامة في خلطة زجاج البوروسيليكات، والذي سُمي كذلك نسبة إلى وجود أكسيد البورون في أي خلطة خاصة بزجاج البوروسيليكات بنسبة لا تقل عن ٥%، وتتراوح نسبته ما بين ٥-٢٥ % في زجاج البوروسيليكات المُستخدم في التشكيل بالمشعل الحراري. ويساعد أكسيد البورون على خفض درجة حرارة تشغيل زجاج البوروسيليكات؛ مما يجعله قابلاً للتشكيل على لهب المشعل الحراري، وذلك لأنه يحتوي على نسب عالية من عنصر السليكا تعمل على رفع درجة حرارة التشغيل. وعلى الرغم من أن زيادة نسبة أكسيد البورون في الخلطة يقلل من درجة حرارة الانصهار للزجاج بسبب تكوينه روابط نقية مع أيونات المعادن القلوية؛ إلا أن تلك الزيادة تزيد من قابلية الزجاج للتبلور(م.٣)، مما يرفع من أهمية موازنة نسبة أكسيد البورن داخل الخلطة لتحقيق الهدف المراد من الزجاج.
٥	الفلسبار Feldsper	يُعتبر الفلسبار Feldsper واحد من أهم المصادر لأكسيد الألومنيوم داخل الخلطة الزجاجية، وعلى الرغم من أن أكسيد الألومنيوم Al_2O_3 لا يُمثل جزءاً كبيراً من معظم خلطات الزجاج، فهو يتواجد في زجاج البوروسيليكات بنسبة تتراوح ما بين ١-٤%، إلا أنه يُعتبر أحد العناصر الهامة، فهو يتواجد كأسيد معدِّل للشبكة الزجاجية Modifying oxide، ويُزيد من قدرة زجاج البوروسيليكات على مقاومة التبلور Devitrification، ويعمل كعامل موازن للسماح

		بمستويات عالية نسبياً من أكسيد الكالسيوم CaO داخل خلطة زجاج البوروسيليكات، كما يساعد على الحد من حدوث الشروخ Cracks بتقليل التغير في اللزوجة ذات الصلة بالتغير في الحرارة(م.٢). وهذا يجعل الكثير من القطع الناتجة من التشكيل على لهب المشعل الحراري باستخدام زجاج البوروسيليكات لا تحتاج إلى وضعها داخل أفران تبريد.
٦	العناصر الملوِّنة لخلطة الزجاج Coloring agents	يتم استخدام العناصر الكيميائية النقية كملوِّنات داخل الخلطة الزجاجية، وتختلف الألوان الناتجة باختلاف العناصر الكيميائية الداخلة في تركيب الخلطة الزجاجية، يُطلق على بعض عناصر التلوين اسم العناصر التقليدية Traditional elements كالنحاس والماغنسيوم والنيكل والتيتانيوم، وهناك عناصر تلوين أخرى تُعرف باسم العناصر الأرضية النادرة(م.٦،ص.٢٩) Rare earths مثل عنصر النيوديميوم neodymium وعنصر البراسيوديميوم praseodymium. أما أكثر العناصر شيوعاً في الاستخدام لتلوين الزجاج هي أكاسيد الكوبالت CoO والحديد Fe_2O_3 والكروم Cr_2O_3 ، والتي تؤثر كلاً منها تأثيراً مختلفاً داخل الخلطة فينتج لون مختلف. وبعض عناصر التلوين هي المسؤلة عن جعل بعض أعمدة الزجاج الملونة حساسة للحرارة، وهي غالباً ما تكون الألوان شديدة الإعتام، وتُعرف باسم الألوان الحساسة للحرارة Heat Sensitive Colors، حُيث تكون لها نقطة غليان منخفضة جداً، وبالتالي فيصعب التعامل معها في درجات الحرارة العالية، ويجب تشكيلها على حرارة لهب منخفضة نسبياً، ويتم تسخينها تدريجياً ببطء شديد. وعلى النقيض من ذلك هناك بعض العناصر الأخرى التي لها نقطة غليان مرتفعة نسبياً ولا تتطاير عند درجات الحرارة المنخفضة، فهي تتحمل حرارة اللهب الشديدة، مثل أكسيد الكروم والفضة والكوبالت والنحاس(م.٧).

-العوامل المؤثرة على زجاج المشاعل أثناء التشكيل بالحرارة:

تؤثر الصيغ الكيميائية chemical composition المختلفة للخلطات الزجاجية على الخواص الميكانيكية والكهربائية والكيميائية والبصرية والحرارية للأعمدة والأنابيب الزجاجية التي يتم إنتاجها؛ وذلك لأنه لا يوجد تركيب كيميائي ثابت مميز لجميع أنواع الزجاج. وهناك مجموعة من العوامل التي تؤثر على المنتجات الزجاجية المشكلة حرارياً تحت تأثير حرارة المشعل، والتي يجب دراستها لضمان الحصول على المنتج بالمواصفات المطلوبة، ومنها:

- **التوتر السطحي Surface tension:**

التوتر السطحي هو ميل أسطح الموائع إلى الانكماش في أقل مساحة سطح ممكنة؛ فعندما يتم تسخين الزجاج لدرجة الليونة فإنه يميل إلى التصرف كسائل، وعندها تميل خاصية التوتر السطحي له إلى تشويه سطحه بطريقة تجعل إجمالي سطحه يتضاغط للداخل، وأقرب مثال للدور الذي يؤديه التوتر السطحي هو تشكيل الخرز الزجاجي بمعظم أشكاله(م.١،ص ١٣٠)، ويميل فناني المشعل الحراري إلى الاعتماد على خاصية التوتر السطحي لإضفاء الشكل الكروي أو شكل الدمعة أو الحصول على الشكل البيضاوي من خلال توزيع تكتلات الزجاج المنصهر بطريقة معينة إعتماداً على خاصية التوتر السطحي، ومن أكثر التأثيرات التي يمكن أن توضح تأثير خاصية التوتر السطحي هي الخرزة ذات فقاعات النقاط كما في الشكل (١)، حيث أن أي فقاعة داخلية يتم تشكيلها عمداً أو حدثت دون قصد تميل إلى أن تصبح شكلاً كروياً واضحاً إذا لان الزجاج بشكل كافٍ. وبسبب التوتر السطحي دائماً ما يظهر سطح الزجاج المُشكل بالمشعل الحراري مصقولاً "fire-polished" بأسلوب

متميز. فخاصية التوتر السطحي تعمل على لملمة أي نتوءات أو فراغات موجودة في سطح الزجاج على بعضها البعض فيظهر ذلك المظهر المصقول.

شكل (١) تأثير خاصية التوتر السطحي على تكوين الخرزة الزجاجية

- **التوافق الحراري Compatibility:**

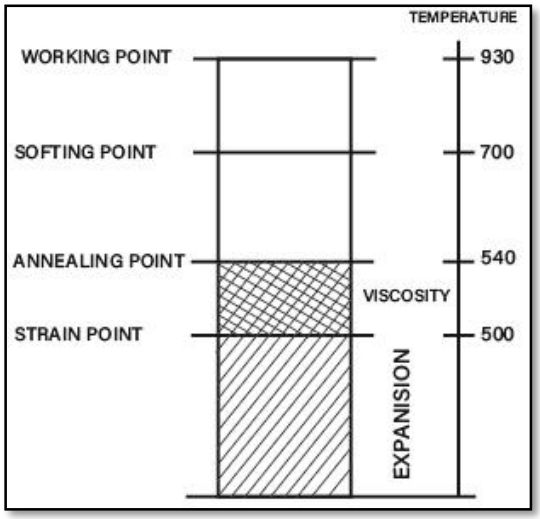
التوافق هو مدى ملاءمة نوعين من الزجاج أو أكثر لتشكيلهما معاً حرارياً، وكان الاعتقاد السائد دائماً أن القيمة العددية لمعامل التمدد الحراري للزجاج هو العامل الوحيد الذي يُحَدد من خلاله مدى توافقهما للتشكيل معاً، ولكن هناك عامل لا يقل في الأهمية عن خصائص التمدد expansion characteristics وهو خصائص اللزوجة The viscosity characteristics للزجاج. فهذان العاملان معاً يحددان مدى التوافق بين نوعي الزجاج(م.٤).

والتمدد الحراري يعني أن الزجاج يتمدد تحت تأثير الحرارة بمعدل نسبي مميِّز، والذي يختلف باختلاف نوع الزجاج ويُسمى هذا الرقم المميِّز لكل نوع زجاج باسم معامل التمدد الحراري ويرمز له بـ (COE). أما اللزوجة viscosity فتعني المعدل الذي ينساب به الزجاج تحت تأثير من الحرارة(م.١،ص.٥٤).

ويؤثر التمدد على التوافق خلال المدى الحراري بالكامل (من بداية درجة التبريد حتى درجة حرارة الغرفة). وبما أن كل العناصر تتمدد بالحرارة وتنكمش بالبرودة فقد كان الاعتقاد بأن أي نوعين من الزجاج يتمددان وينكمشان بشكل متساوٍ أو متشابه فهما بالضرورة متوافقان معاً عند وضعها معاً تحت تأثير الحرارة، ولكن هذا ليس بالضرورة صحيحاً؛ فقد قامت بعض الدراسات باختبار بعض أنواع الزجاج ذات نفس معامل التمدد الحراري وظهر عدم تطابقها، حيث تتغير خصائص التمدد للزجاج بشكل ملحوظ خلال مدى الانتقال الحراري Transition range، وهذا يجعل كون معامل التمدد الحراري والذي يُعبر عنه برقم محدد، لا يصف خصائص التمدد للزجاج بشكل دقيق، فليس هناك رقم واحد يستطيع أن يصف خصائص التمدد للزجاج خلال مدى الحرارة الكامل، بما أنه غير ثابت.(م.٤)

وبينما يؤثر التمدد على التوافق بين نوعي الزجاج في مدى حراري منخفض – أسفل درجة حرارة الإجهاد- فإن خصائص اللزوجة تؤثر على التوافق في مدى التبريد، أي من درجة التبريد إلى درجة الإجهاد كما يوضح الشكل (٢). والاختلاف في اللزوجة بين نوعين من الزجاج سوف يؤدي إلى مشاكل في التوافق compatibility problems بينهما، فلو أن نوع من الزجاج أقسى stiffer من الآخر، فسوف يشدان بعضهما البعض بينما يبرُدان خلال مدى التبريد.

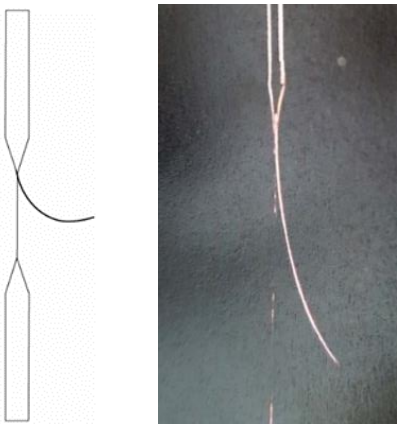
وعلى ذلك فتعويض الاختلافات compensating differences بينهما هو الحل؛ فنوعي الزجاج بخواص اللزوجة المختلفة يحتاجان إلى معامل تمدد حراري مختلف بمقدار ما لكي يتوافقا، حيث يلغي التوتر أو الشد الحادث بفعل اختلاف اللزوجة التوتر أو الشد الحادث بفعل التمدد الحراري.



شكل (٢) توضيح المدى الحراري الذى تؤثر خلاله خصائص اللزوجة والمدى الحراري الذي تؤثر خلاله خصائص التمدد الحراري على مدى توافق نوعين من الزجاج[٤]

يلجأ فناني المشعل الحراري إلى اختبار تحديد مدى توافق نوعين من الأعمدة أوالأنابيب (الغير معلوم مدى توافقهما) للتشكيل بهم معاً، وذلك من خلال:

- تسخين طرفي العمودين في اللهب ووضع الطرفين على بعضهم البعض لمسافة ٢,٥سم.
- تسخين تلك المنطقة (٢,٥سم) في اللهب حتى تمام الذوبان، ثم إخراجهم من اللهب.
- الإمساك بالعمودين بشكل رأسي ثم شد العمود السفلي حتى يتم الحصول على خيط رفيع من الزجاج.
- عندما يبرد الزجاج في تلك الوضعية الرأسية، فإن نوعين الزجاج المتوافقين سوف يجعل الخط الزجاجي الرفيع glass thread محتفظاً بشكله المستقيم، أما النوعين الغير متوافقين فإن الخيط الزجاجي سوف يتخذ شكل المنحنى كما في الشكل (٣). وكلما كَبُرَ هذا المنحنى، كلما كان عدم التوافق بين نوعي الزجاج أكبر.



شكل (٣) اختبار مدى توافق عمودين من الزجاج (الخيط الزجاجي المنحني يدل على عدم التوافق)

وأحياناً ما تعتبر الخرزات الزجاجية glass beads صغيرة الحجم الاستثناء الوحيد من هذه القاعدة؛ بسبب صغر حجم كتلة الخرزة الزجاجية وبسبب شكلها، وعلى ذلك يمكن تشكيلها بعدد من الأعمدة ذات معامل التمدد الحراري المختلف بدون حدوث مشاكل(م.٩،ص.١٤).

- **التبلور Devitrification:**

الزجاج مادة غير متبلورة، ولكن تحت ظروف معينة يُشكل الزجاج بلورات على سطحه تظهر بوضوح في الزجاج الشفاف،(م.١،ص.٦١) والذي يجعل الزجاج يظهر بمظهر متجمد frosted ولا يؤدي التبلور إلى إتلاف الزجاج أو إضعافه من الناحية الهيكلية، ولكنه يفقده إحدى أهم خواصه وهي الشفافية. وحدوث التبلور هو أمر أكثر شيوعاً أثناء التشكيل على المشعل الحراري باستخدام زجاج البوروسيليكات الشفاف، وذلك في الفترة الزمنية ما بين الانتهاء من التشكيل وإخراج القطعة الزجاجية من اللهب، والانتظار حتى يصبح الزجاج صلباً مرة أخرى، وفي تلك الفترة فإنه عند أقل حركة اهتزاز للقطعة الزجاجية تتكون البلورات وتظهر بوضوح مُخلفة منطقة متجعدة على سطح الزجاج(م.٥،ص.٢٤)، ولذلك فهو عيب شائع جداً عند المبتدئين من فناني المشعل الحراري وقد أثبتت التجارب العملية العديدة ذلك. وأحياناً ما يحدث التبلور؛ نتيجة لطول فترة التشغيل بشكل مستمر فى درجات الحرارة العالية.

ويمكن التخلص من الشكل المتجعد أو تأثير التجمد الذي يخلفه التبلور بينما لا تزال القطعة الزجاجية ساخنه، وذلك من خلال تسخين المنطقة المتجمدة على سطح الزجاج مباشرة داخل اللهب حتى يختفي ذلك التأثير تماماً ، مع الحفاظ على القطعة ثابتة بدون اهتزاز حتى بعد خروجها من اللهب حتى يعود الزجاج صلباً مرة أخرى، ويوضح شكل (٤) مظهر الزجاج المتبلور ومظهره بعد التخلص من التبلور.

مظهر التبلور المتجمد في الزجاج

مظهر الزجاج بعد التخلص من التبلور

شكل (٤) مظهر زجاج المشاعل المتبلور والمظهر بعد التخلص من التبلور.

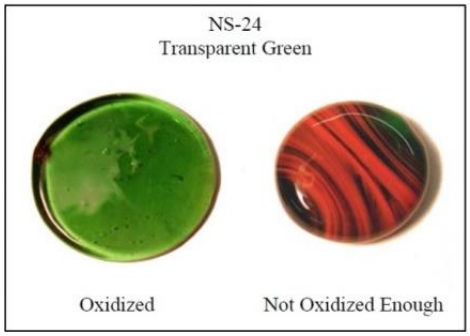
- لهب المشعل الحراري وأثره على الزجاج المستخدم في التشكيل:

تعتبر الحرارة هي العامل الأهم المؤثر في عمليات تشكيل الأعمدة والأنابيب الزجاجية، وباختلاف درجات الحرارة أثناء التشكيل تختلف الكيفية التي يستجيب بها الزجاج المُشكل. ولهب المشعل الحراري هو مصدر الحرارة التي يتعرض لها الزجاج لكي يصبح قابلاً للتشكيل. ونظراً لكون لهب المشعل عبارة عن خليط من غاز البروربان والأوكسجين؛ فباختلاف نسب كلاً منهما للآخر تتغير طبيعة اللهب وتتغير الكيفية التي يؤثر بها على الزجاج المشكل، وبفهم طبيعة اللهب وكيفية التحكم به وتأثيره على الزجاج المختلف الأشكال والألوان يصبح التحكم في شكل المنتج الزجاجي أكثر دقة.

- **كيمياء اللهب Chemistry of Flame:**

المقصود بكيمياء اللهب هو فهم لطريقة عمل لهب المشعل الحراري والتفاعلات الكيميائية بين عناصر التسخين، وكيفية تطويعها للحصول على شكل اللهب المناسب. وهو ضروري جداً لمعرفة كيفية التحكم في حرارة لهب المشعل المناسبة لكل أسلوب إنتاجي، فالأنواع المختلفة للهب (والتى تعني شكل اللهب وتركيبه من حيث نسبة الغازات المكونه له) هي التي تتحكم في كمية الحرارة التي تمتصها القطعة الزجاجية المُشكلة، كما أنها تلعب دوراً أساسياً في تحديد اللون الذي سوف تظهر به

القطعة بعد الانتهاء من تشكيلها، فعلى سبيل المثال يُظهر شكل(٥) تأثير كيمياء اللهب على ألوان الأعمدة الزجاجية؛ حيث أنه من أجل الحفاظ على لون العمود الأخضر الشفاف المسمى (NS-24) بحيث يظل بنفس الشفافية ودرجة اللون، يجب أن يكون اللهب المستخدم مؤكسِداً بالقدر الكافي، أما عند حدوث نقص فى كمية الأوكسجين الموجودة في اللهب يحدث تغيرات غير متحكم بها فى الألوان الناتجة كما هو موضح بالشكل.



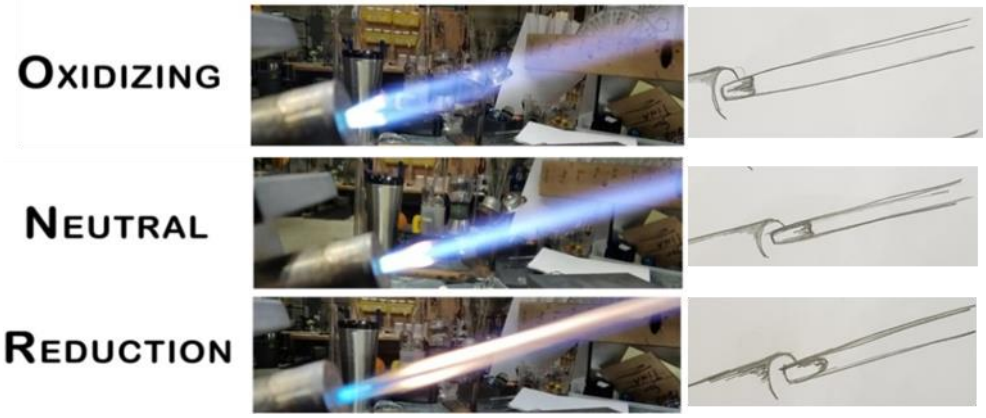
شكل (٥) تأثير كيمياء اللهب على ألوان الأعمدة الزجاجية

ويوجد ثلاثة أنواع من كيمياء اللهب وهو اللهب المؤكسد واللهب المتعادل واللهب المختزل(م.١،ص.١٠٦) ، ويمكن تحديد هذه الأنواع أو التفرقة بينهم نسبياً من خلال: (لون اللهب، طول الشعلة، الصوت).

اللهب المؤكسد oxidizing flame : يحتوي على شعلة زرقاء بالكامل ويكون له صوت هسهسه hissing sound، واللهب المؤكسد هو الأفضل في الحفاظ على الألوان ساطعة وأقرب ما تكون للون الأصلي، وهو أقل سخونة من اللهب المتعادل بسبب زيادة كمية الأكسجين المتدفق بالرغم من احتراق الغازات.

اللهب المتعادل Neutral flame : يحتوي على شعلة زرقاء بمقدمة صفراء محددة بوضوح، وهو اللهب الأكثر سخونة الذي يمكن أن يصل إليه المشعل بين الثلاثة أنواع، وهو الأفضل استخداماً للتشكيل النحتي.

اللهب المختزل reducing flame : يحتوي على شعلة زرقاء بمقدمة صفراء ولكنها ليست واضحة التحديد، والمقدمة الصفراء تكون كثيفة ومجعدة. وهو الأقل استخداماً في التشكيل، والأكثر استخداماً في التبريد بأسلوب التبريد باستخدام لهب المشعل الحراري. ويوضح شكل (٦) أنواع اللهب المختلفة للمشعل وكيفية التفريق بينها.



شكل (٦) أنواع اللهب المختلفة (مؤكسد – متعادل – مختزل)

- **كيفية التحكم في نوع اللهب:**

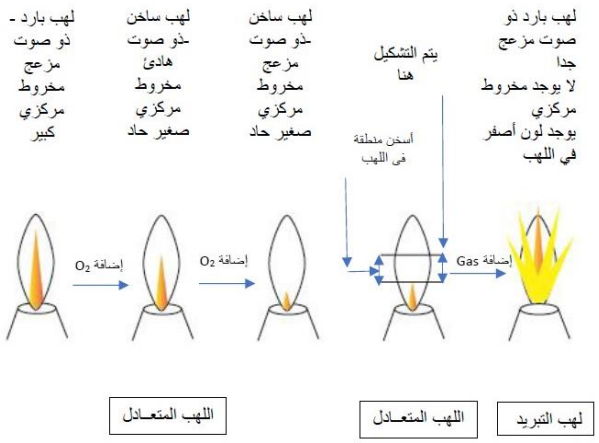
هناك عاملين أساسيين يؤثران على نوع لهب المشعل: حجم المشعل الحراري، ونوعه.

العامل الأول حجم المشعل: إذا كان حجم المشعل الحراري صغيراً؛ فإن اللهب الناتج عنه يكون صغير الحجم أيضاً، وبالتالي عندما يكون نوع اللهب المطلوب التشكيل به هو لهب مؤكسد، فإن الحرارة المتوفرة به لا تكفي للصهر التام للزجاج بشكل مناسب، وذلك لأن اللهب المؤكسد أقل حرارة من اللهب المتعادل، وعلى ذلك فعند تشكيل أحجام كبيرة من الأشكال الزجاجية في لهب مؤكسد لمشعل صغير يكون هناك صعوبات في تحقيق تأثيرات معينة، ولكن عند استخدام لهب مشعل حراري كبير الحجم فإن حجم اللهب يكون كبير أيضاً، وبالتالي عند الحاجة إلى استخدام اللهب المؤكسد يكون به ما يكفي من الحرارة لصهر الزجاج والحصول على التأثيرات المطلوبة.

أما العامل الثاني فهو نوع المشعل الحراري، وهناك ثلاث أنواع رئيسية للمشعل الحراري ثنائي الوقود(م.١،ص.٨٠) : (مشعل الخلط السطحي Surface mix torch؛ حيث يتم خلط الأكسجين والبروبان بمجرد خروجهما من فوهة المشعل، ومشعل الخلط المسبق Pre-mix torch؛ حيث يتم خلط الغازات معاً داخل المشعل الحراري، ومشعل الخلط المزدوج Dual mix torch؛ وهو مشعل أكثر تطوراً ويحتوي على شعلتين أحدهما مركزية داخلية للمزج بين الغاز والأوكسجين، وشعلة أخرى تحيط بالأولى ذات خلط سطحي). ويُعتبر مشعل الخلط المزدوج أفضلهم قدرة في التحكم أو الحصول على أنواع اللهب الصحيحة اللازمة لكل عملية تشكيل. وذلك لأن الغازات تحترق بفاعلية أكثر في لهب هذا النوع من المشاعل ولذلك فإنه من السهل الحصول على اللهب المؤكسد المناسب.

ولمزيد من التحكم في الحصول على اللهب المؤكسد/المختزل المناسب فإن ضبط ضغط غاز المشعل بالطريقة المناسبة يجعل المشعل يعمل بكفاءة وفاعلية أكثر.

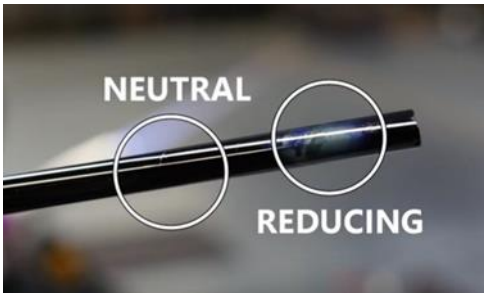
والنقطة الأخيرة للحصول على تحكم كامل في نوع اللهب المطلوب (مؤكسد/مختزل) هي كيفية ضبط اللهب والنسب المطلوبة للأكسجين المُضاف، حيث يبدأ إشعال المشعل بغاز البروبان أي يكون لهب بارد قليلاً (relatively cool) ومختزل بالكامل ثم يتم البدأ بإضافة الأكسجين؛ لتزداد حرارة اللهب وتقل حدة الاختزال داخل اللهب ومع إضافة المزيد من الأكسجين تزداد الحرارة حتى تصل إلى أقصاها وعندها يكون اللهب متعادل، وبمجرد الوصول إلى تلك المرحلة فإن أي إضافة للأكسجين تجعل حرارة اللهب تقل ويصبح اللهب مؤكسداً أكثر كما توضح الخطوات فى شكل (٧) ويوضح كذلك أن أفضل منطقة للتشكيل فى ذلك اللهب المتعادل، هى أعلي المنطقة الوسطي، حيث تكون الحرارة أشد درجة حرارة للهب. فيحين أنه عند إضافة المزيد من الغاز مع ترك نفس معدل تدفق الأكسجين كما هو نحصل على لهب التبريد المتطاير الشرر كما يظهر بالشكل.



شكل (٧) تأثير إضافة كلاً من الأكسجين والغاز للشعلة وكيفية تأثيرهما على كيمياء اللهب

ونظراً لكون اللهب المتعادل هو أكثر أنواع اللهب مناسبة لكثير من طرق التشكيل بالمشعل الحراري؛ فيجب التأكد من الحصول على ذلك اللهب المتعادل بشكل صحيح، ويتم ذلك بمحاولة ضبط اللهب ليكون متوازناً بين الأوكسجين والبروبان، ومن ثم يتم اختبار ذلك اللهب من خلال إحضار عمود ملون من الألوان التي تتأثر بكيمياء اللهب ووضعه في المنطقة المتعادلة°من اللهب حتى يتوهج باللون البرتقالي كما في الشكل (٨)، ثم عندما يتم سحبه خارج اللهب يبقي اللون كما هو دون تغير، وفي حالة تغير اللون كما في الشكل(٩) يكون اللهب مختزل ويجب إعادة ضبطه.

شكل (٨) توهج العمود الزجاجي باللون البرتقالي



شكل (٩) تأثير فرق اختلاف كيمياء اللهب على عمود زجاجي ملون

- **تأثير حرارة لهب المشعل على الزجاج المستخدم في التشكيل:**

تعتمد تقنية التشكيل بالمشعل الحراري على المهارة الفنية "اليدوية" للتحكم في الحرارة والكيفية التي يتعرض بها الزجاج المُشكل للحرارة أثناء مراحل التشكيل بالكامل (مرحلة التحضير للتشكيل-مرحلة التشكيل- مرحلة التبريد)، فيجب معرفة المنحنى الحراري لمراحل التشكيل وأهم النقاط الحرارية المؤثرة على تشكيل الأعمدة والأنابيب الزجاجية والكيفية التي تستجيب بها الأعمدة والأنابيب الملونة لحرارة لهب المشعل.

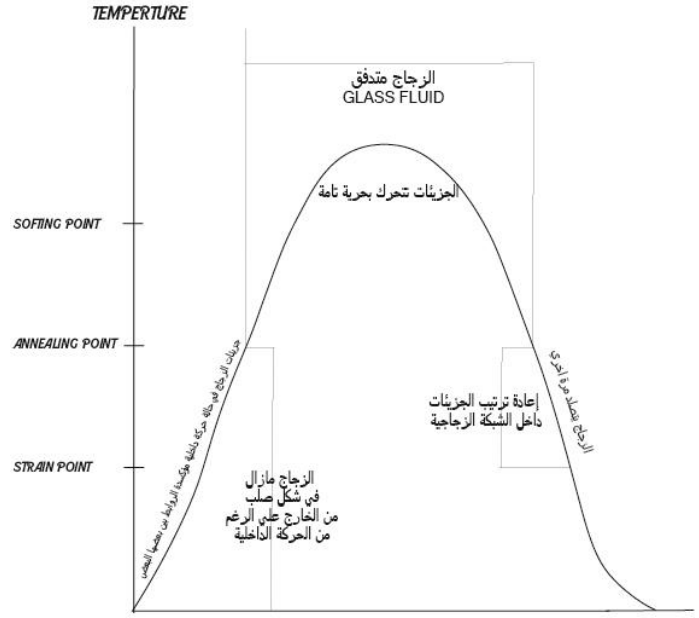
وهناك ثلاثة نقاط حرارية أساسية هامة ومؤثرة في المنحنى الحراري الخاص بتشكيل الزجاج بدءاً من وجود الزجاج في درجة حرارة الغرفة مروراً بدرجة الانصهار، ثم العودة إلى درجة حرارة الغرفة مرة أخرى. وتلك النقاط هي(م.٩،ص.٣٧): درجة الإجهاد strain point، ودرجة التبريد annealing point، ودرجة الليونه softening point. فعندما يبدأ تسخين الزجاج صعوداً من درجة حرارة الغرفة، فإن درجة حرارة الإجهاد هي أول نقطة حرارية مؤثرة يصل إليها الزجاج، وعندها تكون جزيئات الزجاج قد امتصت الحرارة وبدأت في الحركة الداخلية مُكسرة الروابط بين بعضها البعض، وذلك على الرغم من أن الزجاج ما زال يبدو صلباً من الخارج. وباستمرار تسخين الزجاج صعوداً يصل إلى درجة التبريد ثم درجة الليونه، وخلال تلك المراحل فإن المزيد من الروابط تُكسر بين الجزيئات إلى أن يصبح الزجاج سائلاً تماماً في درجة حرارة التشغيل working range، وعند هذه الدرجة فإن الجزيئات تتحرك بحرية تامة وتقوم بإعادة ترتيب أماكنها في الروابط القائمة بينها، وخاصة إذا حدث تشكيل للزجاج بالنفخ أو الشد أو السحب أو اللوي.

عند الانتهاء من تشكيل الزجاج والخروج من لهب المشعل فإن الزجاج يبدأ في فقدان الحرارة التي اكتسبها أثناء التشكيل، فيصل إلى درجة الليونه أولاً، وأسفل تلك الدرجة يصبح الزجاج صلباً مرة أخرى من الخارج بينما مازالت جزيئاته الداخلية في حالة حركة، وبالتالي يبرد السطح الخارجي ويتصلب أسرع من السطح الداخلي الذي مازال في حالة حركة، وهذا الاختلاف هو ما يسبب الإجهاد إن لم يتم تبريده بطريقة صحيحة، ومع استمرار الانخفاض في درجات الحرارة يصل الزجاج إلى درجة التبريد، وهي المرحلة التي تستقر فيها جميع الجزيئات في روابطها بشكل سريع نسبياً، وباستمرار الانخفاض في درجات الحرارة يصل إلى درجة الإجهاد. وبمجرد انخفاض درجات الحرارة لدرجات أقل من هذه الدرجة فلا تحدث أي حركة ملحوظة في الجزيئات، وبالتالي فلا يمكن إزالة أي إجهادات ما زالت موجودة داخل الزجاج. وهذه الإجهادات هي ما

تؤدي إلى حدوث شرخ أو كسر في الزجاج ما لم يتم تبريده بالشكل المناسب. ويوضح شكل (١٠) تلك المراحل الحرارية المختلفة التى مر بها الزجاج عند تعرضه للهب المشعل الحراري. وعند التشكيل بالأعمدة الزجاجية الملونة يظهر تأثير الحرارة باختلاف تركيب الزجاج الملون، وهناك ثلاثة أنواع من الأعمدة الزجاجية الملونة:

النوع الأول (الطبيعي) Normal: لا يتأثر بدرجة الحرارة اللهب الذي يتم تشكيله به ولا بكيمياء اللهب، فهو يحتفظ برونقه وبريقه دون تغير. وهذه الألوان هي غالبية ألوان الأعمدة والأنابيب الزجاجية.

النوع الثاني (المُؤكسد/المُختَزل): وهو يتصرف بطريقة مختلفة في اللهب المختزل عن اللهب المؤكسد، وهذا النوع من الألوان شديد الحساسية للجو العام للهب المُستخدم في تشكيله، فأي تغير في نسب الأكسجين أو البروبان يُعطي تأثيرات مختلفة. وهذا النوع من الألوان يُغير من قابلية الزجاج للتشكيل إما أن يجعله أكثر صلابة أو أكثر لزوجة عن الزجاج الشفاف أو بعض أنواع ألوان أعمدة الزجاج الأخرى، وأحياناً ما يؤثر على توافقه مع ألوان زجاج أخرى أيضاً. وبشكل عام فمعظم ألوان زجاج البوروسيليكات ينبغي أن يتم تشكيلها في لهب مؤكسد، لضمان ثبات لونها.



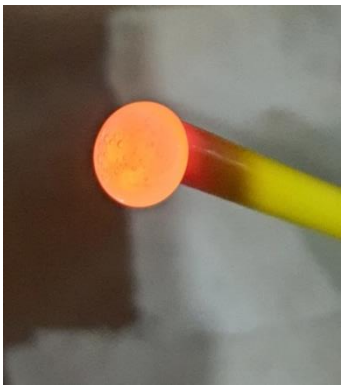
شكل (١٠) تأثير حرارة لهب المشعل على المنحنى الحراري للزجاج بدءاً من درجة حرارة الغرفة والعودة لها مرة أخرى[٦]

النوع الثالث (الألوان المتأثرة بالحرارة) Striking colors: هي الألوان المتغيرة نتيجة للحرارة، والتي تصبح شفافة في الحالة السائلة للزجاج بسبب أن جزيئات المعدن تتوزع في محلول في حالة الزجاج السائلة ثم تتبلور مرة أخرى في مرحلة التبريد(م.٥،ص.٢٩)، كما في شكل (١١). وغالباً ما تكون الألوان التي تحتوي على السيلينيوم ذو اللون الذهبي الوردي Selenium-gold pinks في زجاج الصودا جير، والجرمانيوم ذو اللون النحاسي الياقوتي Germanium-copper rubies في زجاج البوروسيليكات. ويتم إظهار اللون الأصلي للعمود بعد الانتهاء من تشكيله من خلال تثبيت القطعة المُشكلة في درجة حرارة بين (درجة حرارة التبريد ودرجة حرارة الليونة) لفترة من الوقت. وهناك طريقتن لجعل الألوان المتغيرة بالحرارة تعود للونها الأصلي إما من خلال التعريض المباشر للهب Flame striking أو من خلال التبريد في فرن، ويُعتبر استخدام اللهب أفضل عند الرغبة في الحصول على لون متدرج، أو معرفة جميع درجات اللون التي يمكن أن تظهر، حيث تعتمد شدة اللون وكثافته على درجة الحرارة والوقت المعرض لهما اللون.

أما استخدام الفرن فيكون عند الرغبة في الحصول على لون محدد متساوي في كامل القطعة المُشكلة.

شكل (١١) تأثير أجزاء من عمود زجاج من الألوان التي تتغير بالحرارة بلهب المشعل

وهناك نوع آخر من الألوان المتأثرة بالحرارة، وهي الألوان شديدة الحساسية للحرارة HEAT SENSITIVE COLORS: فهي ألوان تتأثر بالحرارة بشدة، مما يعني أنه يجب الحذر الشديد عند تسخينها لتجنب غليانها في اللهب كما في الشكل (١٢)، وهذه الحساسية الشديدة للحرارة تنتج من كون عناصر التلوين الكيميائية الخاصة بتلك الألوان لها نقطة غليان أقل بكثير من العناصر الأخرى؛ وهذا يتسبب في جعل اللون يظهر في مظهر الغليان، وينتج فقاعات إذا لم يتم اتخاذ الإجراءات الملائمة للتعامل مع تلك الألوان أثناء التشكيل بها، وبالتالي فيجب استخدام لهب بارد cool flame أثناء تشكيلها أو تشكيلها في الأجزاء الباردة من اللهب كحواف اللهب أو في المنطقة التي تكون أبعد ما يكون عن فوهة المشعل الحراري، كما يُفضل تغليف اللون شديد الحساسية للحرارة بزجاج شفاف لتجنب غليان اللون أثناء التشكيل به ولإعطائه المزيد من الوقت للتشكيل داخل اللهب. وغالباً ما تكون تلك الألوان هي الألوان المعتمة.



شكل (١٢) ظهور فقاعات تظهرغليان الألوان شديدة الحساسية للحرارة عند تسخينها في اللهب بدون اتخاذ الاحتياطات الملائمة

- التبريد Annealing:

هو عملية إعادة تسخين وتبريد بطئ للقطعة الزجاجية التي تم الانتهاء من تشكيلها؛ وذلك للتقليل أو الحد من الإجهادات الغير مرغوب فيها داخل قطعة الزجاج(م.١،ص.٦٣). عندما يتم تبريد الزجاج أي أن يكون في درجة التبريد Annealing temprature، فإن الجزيئات بالكاد تتحرك وتعيد ترتيب نفسها داخل الروابط بين بعضها البعض، وعندها يحتاج الزجاج للبقاء في تلك الحرارة الثابتة لفترة كافية من الزمن (مرحلة النقع soaking) لجعل الجزيئات تستقر داخل مواضعها الجديدة وبالتالي تحرر الإجهادات. ومن خلال التبريد البطئ للزجاج فإن درجة حرارة الجزيئات تنخفض بنفس المعدل بحيث يصبح الانخفاض في درجة حرارة السطح الخارجي بنفس معدل فقد الحرارة للسطح الداخلي.

ولتبريد الزجاج المشكل بالمشعل الحراري حالتين:

الحالة الأولى: عندما يتم وضع القطعة الزجاجية داخل فرن التبريد بمجرد الانتهاء من تشكيلها، وبالتالي تكون القطعة ساخنة ومازلت أعلى أو أقل بفروق بسيطة عن درجة التبريد، وتلك القطعة تدخل مباشرة في المرحلة الثانية من دورة التبريد والتي تُسمي بالنقع soaking، وتلك هي الطريقة الأفضل للتبريد، والتي تُحافظ بنسبة كبيرة على القطع الزجاجية المُشكلة من الكسر.

الحالة الثانية: وهي عندما تُترك القطعة المُشكلة بعد الانتهاء من تشكيلها لتصل إلى درجة حرارة الغرفة قبل وضعها في فرن التبريد، وبالتالي فتلك القطعة تحتاج إلى أن تمر بالمرحلة الأولى من دروة التبريد والتي تُعرف باسم التسخين السريع Fast heating، ومن الممكن إجراء تلك الخطوة على لهب المشعل فيما يُعرف باسم التبريد بلهب المشعل flame annealing، ومن ثم وضعها في فرن التبريد في المرحلة الثانية مباشرة. أو وضعها في فرن التبريد في المرحلة الأولى من دورة التبريد. ولا ينصح بتلك الحالة من التبريد؛ نظراً لخطورتها على القطع الزجاجية المُشكلة خاصة القطع كبيرة الحجم.

مع ملاحظة أن زجاج الصودا جير (الزجاج اللين) يجب تبريده مباشرة بمجرد خروجه من اللهب، في حين أنه يمكن ترك زجاج البوروسيليكات (الزجاج الصلب) ليبرُد بعد الانتهاء من تشكليه مباشرة ليصل إلى درجة حرارة الغرفة بدون الحاجة إلى تبريده في أفران وبدون الخوف من تعرضه للإجهاد.

والإجهاد هو السبب الرئيسي لحدوث التشققات أو الشروخ، والتي تؤدي إلى كسر الزجاج ويحدث لسببين:

1. خطأ في توزيع الحرارة أثناء التشكيل كأن يتم إضافة قطعة زجاجية لأخرى، ولم تكن القطعتان بنفس درجة الحرارة، أو لحام عمودين في بعضها البعض بطريقة ينتج عنها ما يُعرف بالتجعدات.
2. خطأ أثناء تبريد القطعة على اللهب أو أثناء وضع خطة دورة التبريد annealing cycle.

ويعتمد حجم الإجهاد داخل قطعة الزجاج على أبعادها والسرعة التي تم تبريدها بها. ففي مكعب صغير أو خرزة صغيرة من الممكن أن يكون الإجهاد نسبياً عديم الأهمية. أما في الأحجام الكبيرة فإن الإجهادات قد تصبح كبيرة كفاية لإحداث وضع غير مستقر، والذي قد ينتظر الفرصة لإحداث شروخ أو تشققات. وفي النهاية عندما يكون المجموع الكلي لكل الإجهاد الحاصل داخل القطعة الزجاجية أكبر من قوة شدة tensile strength يؤدي ذلك إلى حدوث التشققات. والطريقة الوحيدة للحد من تلك الإجهادات لنسبة معقولة هو التبريد المناسب.

- **فروق الحرارة The heat differential:**

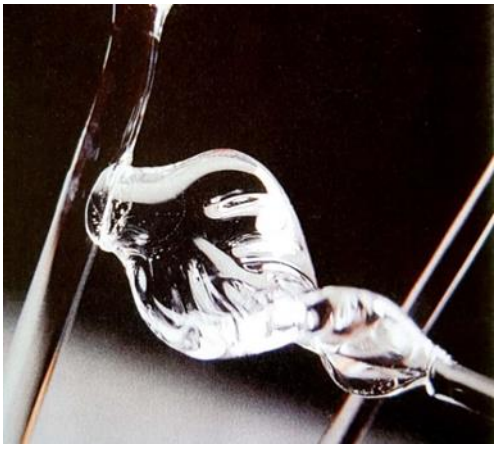
إذا كانت فروق الحرارة كبيرة سواء في القطعة نفسها أو بين قطعتي الزجاج المراد وصلهما معاً، يجب تدفئة warm القطعة الزجاجية أولاً على الجزء الخارجي من لهب المشعل إذا لم تكن شُكلت من قبل، أو وضعها في الفرن لتبريدها بطريقة صحيحة إذا كانت شُكلت من قبل، وذلك قبل البدء في استخدامها في التشكيل مرة أخرى، وذلك لضمان عدم حدوث الشقوق والتجعدات، ويوضح شكل (١٣) مظهر شبكة العنكبوت الذي تتخذه الشروخ، أما شكل(١٤) التجعدات التي تحدث بسبب التقاء (لصق) قطعتين من الزجاج معاً، ويمكن تجنب حدوث تلك التجعدات من البداية إذا كان سطحي الزجاج المراد وصلهما معاً ساخنين hot ومتدفقين fluid بالقدر الكافي.

وتختلف طريقة معالجة الشقوق إذا ما كانت شقوق أو تصدعات سطحية أو شقوق داخلية(م.ه،ص.٢٦).

الشقوق السطحية: الشقوق السطحية غالباً ما تحدث نتيجة أن السطح الخارجي للزجاج قد تم تسخينه ولكن لم يصل إلى درجة الاحمرار الساخنة، وبالتالي فإن التوتر السطحي يظهر أثره بينما يبرد الزجاج؛ نظراً لأن الجزء الداخلي مازال بارداً والسطح

ساخن، ويحدث هذا نتيجة تركيز حرارة المشعل على نقطة محددة يتم التشكيل فيها، ثم وبدون قصد تضرب حرارة المشعل نقطة أخرى من سطح الزجاج.

شكل (١٣) مظهر شبكة العنكبوت الذي تتخذه الشروخ



شكل (١٤) التجعد الناتج عن لصق قطعتين غير متساويتين في الحرارة

يتم معالجة الشقوق السطحية من خلال تدفئة القطعة الزجاجية إما على طرف لهب ناعم وكثيف أو وضعها في فرن تبريد في فترة التثبيت، ثم توضع القطعة تحت اللهب وببطء يتم رفعها داخل اللهب وتسخين المنطقة المتضررة من الشقوق حتى يتدفق الزجاج في منطقة الشقوق مع باقي الزجاج المحيط به ويصبح السطح ذو مظهر أملس مرة أخرى.

الشقوق الداخلية: الشقوق الداخلية تحدث في داخل قطعة الزجاج نتيجة لفروق درجات الحرارة العالية والمختلفة بين طبقات الزجاج المتعددة. ولمعالجة الشقوق الداخلية يتم تدفئة warming up الزجاج، ثم حمل القطعة الزجاجية على طرف لهب ناعم ومحدد narrow ، وتركيز اللهب على المنطقة ذات الاتصال المباشر بالشقوق فقط. وتدريجياً يتم إدخال القطعة الزجاجية في اللهب (داخل اللهب) لتسخين نهاية أعمق شق موجود داخل القطعة الزجاجية، والهدف هنا هو تليين نهاية الشق داخل القطعة الزجاجية حتى لا يمتد الشق أكثر، وبمجرد تليين نهاية الشق يتم التسخين من جانب لآخر داخل الشق حتى يلين الزجاج بالكامل ويتدفق معالجاً الشق أو التصدع الحاصل داخل القطعة الزجاجية.

ولابد من تجنب حمل القطعة الزجاجية المُبرده بالملقاط tweezers، حيث أن المزيج الناتج عن الصدمة الحرارة thermal shock – نتيجة فرق الحرارة بين القطعة الزجاجية والملقاط قد يسبب مشاكل، خاصة إذا كانت درجة الحرارة قريبة من درجة حرارة الإجهاد.

- **دورة التبريد:**

هي الخطة التي يتم وضعها لتبريد قطعة زجاجية داخل فرن التبريد بطريقة مناسبة تسمح للإجهادات الداخلية بالتحرر؛ وبالتالي المحافظة على القطعة الزجاجية المُشكلة من الكسر. وتتكون تلك الدورة من أربع مراحل (التسخين السريع – التثبيت أو النقع – التبريد البطئ – التبريد السريع)، وتعتمد على ثلاثة عوامل رئيسية هي: معامل التمدد الحراري – سمك الزجاج – درجة حرارة التبريد.

أما التبريد باستخدام لهب المشعل الحراري فيتم عن طريق تبريد القطعة الزجاجية المُشكلة باستخدام لهب المشعل، وهذه الطريقة في التبريد ليست هي الطريقة المُثلى أو الأفضل، وتستخدم عادة مع المنتجات صغيرة الحجم مثل الخرزات والأشكال البسيطة ومنتجات زجاج البوروسليكات، ويفضل أن يحاكي التبريد بلهب المشعل نفس مراحل دورة التبريد التي تتم باستخدام فرن التبريد، فيتم تجهيز لهب المشعل للتبريد عن طريق رفع معدل تدفق الغاز قليلاً مع ترك معدل الأوكسجين كما هو، كما

يجب أن يكون اللهب ناعماً جداً وكثيفاً مع شرر أصفر اللون، ويُعتبر أفضل تقنية هي إعادة تسخين القطعة الزجاجية بشكل متكرر حتى يتوهج الزجاج بلون أحمر باهت، وكلما كبر حجم القطعة الزجاجية أو ارتفع معامل التمدد الحراري COE؛ كلما كان من الأفضل زيادة عدد المرات التي يجب إعادة تسخين الزجاج بها.

وإذا كان التبريد باستخدام لهب المشعل الحراري فقط فيجب وضع القطع الزجاجية التي تم الانتهاء من تبريدها على لهب المشعل الحراري إما في بطانية الصوف الزجاجي fiber blanket وتركها بالداخل لحوالي من ٢٠ إلى ٣٠ دقيقة، حسب كمية القطع وحجمها، لكي تصل إلى درجة حرارة الغرفة، وإما يتم وضعها في الڤيرميكوليت vermiculite حيث تُترك القطع الزجاجية في الحاوية الساخنة لحوالي ٤٥ دقيقة قبل نقلها إلى الحاوية الأخرى التي تحتوي على ڤيرميكوليت بدرجة حرارة الغرفة وتترك بها لتمام فقد الحرارة (م.٨،ص.٤١).

- الخواص الحرارية لبعض أنواع زجاج المشاعل ومواصفات استخدامها عند التشكيل:

هناك عدة شركات تنتج نوعيات من الأعمدة والأنابيب الزجاجية شائعة الاستخدام أكثر من غيرها؛ لمواءمتها مع احتياجات المستخدمين بشكل أفضل، وفيما يلي ذكر لعدد من خواص منتجات تلك الشركات من الأعمدة والأنابيب:

زجاج الصودا جير Soda-Lime:

توجد العديد من الشركات العالمية التي تقوم بإنتاج أنواع من الأعمدة الزجاجية الملونة من زجاج الصودا جير (تتراوح أقطارها من ٣مم إلى ٤٠ مم)، وفيما يلي بيان بهذه الأنواع وأهم خصائصها:

جدول رقم (٢): الخواص الحرارية لمجموعة مختلفة من الأعمدة الزجاجية المشكلة بزجاج الصودا جير

الاسم التجاري	معامل التمدد الحراري COE	درجة حرارة التشغيل ºC Working Tempertur e	درجة الإجهاد ºC Strain Point	مدى التبريد ºC Annealin g Range	أهم المواصفات عند الاستخدام
Moretti\ Effetre Glass	104	926	448	493-520	- له مدى واسع من الألوان المتاحة. - قابليته جيدة للتشكيل باللهب. - لا يُناسب اللهب المختزل ألوانه، لتحولها إلى اللون الداكن أو الأسود. - عند التشكيل به يجب أن يتم ذلك بشكل سريع لضمان نجاح التشكيل. - يُفضل التشكيل بأقل كمية ممكنة من الحرارة عند استخدامه للحفاظ على تفاصيل العمل الزجاجي.
Bullseye Glass	90	815	437	504	- يتحمل ظروف تشكيل صعبة، ولذا يسهل التحكم في الحرارة خلال استخدامه في التشكيل. - يفضل عند تنفيذ الأشكال المفرغة.

Lauscha Glass	95-105	-	-	515	- زجاج متوسط الليونة، ولذا فهو مفضل عند الحاجة لوضع تفاصيل كثيرة ودقيقة ومركبة في التشكيل. - اللزوجة المرتفعة نسبياً له تزيد من فترة التشغيل وتقلل من الصدمات الحرارية، وبالتالي فهو يقاوم الشروخ والكسور. - يمكن استخدامه مع جميع الأنواع الأخرى بسبب المدى الواسع لمعامل تمدده الحراري.
Murano Glass	104	927	-	500-600	- أكثر ليونة من الأنواع الأخرى، ولذا يصعب استخدامه في المنتجات الزجاجية ذات التفاصيل الدقيقة والمركبة. - يمكن استخدامه مع زجاج مورتي لتطابق معامل التمدد الحراري لهما.

- **زجاج البوروسيليكات Borosilicate Glass:**

توجد العديد من الشركات العالمية التي تقوم بإنتاج أنواع من الأنابيب الزجاجية من زجاج البوروسليكات (تتراوح أقطارها الخارجية من ٩ مم إلى ٦٠ مم، وسمكها من ٢مم إلى ٥ مم)، وفيما يلي بيان بهذه الأنواع وأهم خصائصها:

جدول رقم (٣): الخواص الحرارية لمجموعة مختلفة من الأنابيب المشكلة بزجاج البوروسليكات

الاسم التجاري	معامل التمدد الحراري COE	درجة حرارة التشغيل ºC Working Tempertur e	درجة الإجهاد ºC Strain Point	مدى التبريد ºC Annealin g Range	أهم مواصفات الزجاج عند الاستخدام
Northstar	33.2	1220	515	565	- يمكن استخدامه مع زجاج Alchemy لتطابق معامل التمدد الحراري. - يحتوي على مجموعة لونية كبيرة مقارنة بالأنواع الأخرى.
Glass Alchemy	33.2	-	515	-	- يمكن استخدامه مع زجاج Northstar لتطابق معامل التمدد الحراري. - يُفضل استخدامه للتشكيل في اللهب المتعادل للحفاظ على حيوية وبريق الزجاج والحفاظ على الألوان التي تحتوي

					على عنصر الكروم من التعرض للشروخ والتشققات.
Corning 7740	32.5	1252	510	560	- يتمتع بمعامل تمدد حراري منخفض، ولذا فهو ملائم لتشكيل زجاج المعامل والتطبيقات الصناعية.
Schott Duran	33	1260	510	560	- يتمتع بمعامل تمدد حراري منخفض، ولذا فهو ملائم لتشكيل زجاج المعامل والتطبيقات الصناعية.

النتائج والتوصيات:

أولاً:النتائج:

١- يساعد تفسير حركة التفاعلات بين العناصر المكونة لخلطة زجاج المشعل الحراري على فهم كيفية الاستفادة منها في عمليات التشكيل لتلافي عيوب الإنتاج.

٢- التوصل للعلاقة بين أهم العوامل المؤثرة على زجاج المشاعل أثناء التشكيل بالحرارة (التوتر السطحي – التوافق الحراري – التبلور)، وبين نوعيات الزجاج المُشكل بالمشعل الحراري؛ لتلافى المشكلات الأساسية فى عمليات التشكيل.

٣- أثر كيمياء لهب المشعل الحراري (المؤكسد – المتعادل – المختزل) على خصائص الزجاج (الشفاف – الملون) أثناء مراحل تشكيله بالحرارة.

٤- تم تحديد الخواص الحرارية لبعض أنواع زجاج المشاعل الأكثر انتشاراً ومواصفات استخدامها عند التشكيل.

ثانياً:التوصيات:

- ضرورة استكمال مسارات الأبحاث التي تهتم بدراسة خصائص زجاج المشعل وكيفية الاستفادة منها في تنفيذ المنتجات الزجاجية المشكلة بالمشعل الحراري.

- وضع خطط لتفعيل مسارات التعاون بين الجهات الأكاديمية المتخصصة (قسم الزجاج) مع سوق العمل بمجالات إنتاج الزجاج بالمشعل الحراري، للتعرف على أهم المشكلات ووضع الحلول الملائمة لها.

- تحفيز الخريجين المتخصصين على تبني إنشاء وحدات إنتاجية خاصة بهم تعمل في مجال إنتاج الزجاج بالمشعل الحراري كأحد مشروعات الصناعات الصغيرة.

المراجع:

١- أمل خالد أبوسيف "الأثر التقني كقيمة فاعلة فى جماليات الزجاج المُشكل بالمشعل الحراري –دراسة تحليلية تجريبية-" رسالة ماجستير، كلية الفنون التطبيقية، جامعة حلوان، ٢٠١٥م.

- Amal Khaled Abouseif "Al Ather Al Teqany kkema faala fe gamalieat al zogag al moshakel be al mashal al harary" Resalat Magerteer, Koleyat Al Fenon Al Tatbeya, Gameat Helwan, 2015.

2- Abdul Ghani Olabi, Aran Rafferty, Muhammad Hasanuzzaman, Mustafa Sajjia "Properties of Glass Materials" Elsevier Inc., 2016.

3- Christian Kunert, Reiner Bartsch, Ulrich Peuchert "Borosilicate glass with high chemical resistance and use thereof" 2004.
4- Daniel W. Schwoerer, Bullseye Glass Co." Compatibility of Glasses: COE Does Not Equal Compatibility" Tech Notes 3, A Technical Supplement from Bullseye Glass Co. January, 2013 Edition.
5- Elizabeth Ryland Mears "Flameworking:Creating Glass Beads, Sculptures & Functional Objects" Book, Lark Book, 2005.
6- Heinz G. Pfaender "Schott Guide to Glass" Book, Chapman & Hall, London, 1996.
7- Joseph S. Amstock" Handbook of Glass in Construction" Book, New York: McGraw-Hill Professional, June 1, 1997.
8- Kimberley Adams "The Complete Book of Glass Beadmaking" Book, Lark Book, 2005. 9- Louise Mehaffey "Glass Beads: Tips, Tools, & Techniques for Learning the Craft" Book, Stackpole Books, 2011.
10- Corning Museum of Glass, Online, https://www.cmog.org/article/types-glass, December, 2019.
11- Northstar for Glass, Online, https://northstarglass.com/heat-sensitive-colors, March, 2020.

---

[١] والتى تعني خط تشكيل المنتجات الزجاجية المُشكلة بالمشعل الحراري بالكامل، بدءً من كيفية تسخين الأعمدة والأنابيب الزجاجية إستعداداً لإستخدامها ومروراً بمراحل تشكيل المنتجات الزجاجية المختلفة وإنتهاءً بتريد تلك المنتجات.

[٢] (Working Range) هو المدى الحراري الذي يمكن تشكيل الزجاج به.

[3] "Surface tension is the tendency of fluid surfaces to shrink into the minimum surface area possible".

[٤] من إعداد الباحثة

[٥] المنطقة المتعادلة: هي المنطقة التي تقع في وسط اللهب أي بعد بداية اللهب بعدة سنتيمترات إبتعاداً عن فوهة المشعل.

[٦] من إعداد الباحثة